

Dottorato di ricerca in
Ingegneria dei Sistemi Idraulici, di Trasporto e Territoriali
-XXII Ciclo-

Università degli studi di Napoli “Federico II”



Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti
“Luigi Tocchetti”

TESI DI DOTTORATO

*Modelli per la costruzione del diagramma delle velocità operative su strade
extraurbane a due corsie e ad accessibilità diffusa*

Candidata

Dott.Ing. Francesca Russo

Coordinatore Scientifico

Prof. Ing. Bruno Montella

Tutor

Prof. Ing. Gianluca Dell'Acqua

Coordinatore di Indirizzo

Prof. Ing. Renato Lamberti

*Tutta quella diversità delle cose nella natura,
che troviamo adatte a tempi e luoghi differenti,
non può derivare da altro che dalle idee e dalla volontà
di un Essere che esiste necessariamente.
Se ho visto più lontano, è perché stavo sulle spalle di giganti.
Se ho fatto qualche scoperta di valore, ciò è dovuto
più ad un'attenzione paziente che a qualsiasi altro talento.
La verità si ritrova sempre nella semplicità, mai nella confusione.
Posso misurare il moto dei corpi, ma non l'umana follia.*

ISAAC NEWTON

Sommario TECNICO

Modelli per la costruzione del diagramma delle velocità operative su strade extraurbane a due corsie e ad accessibilità diffusa

Introduzione

L'analisi della sicurezza stradale ha da tempo catturato l'attenzione della sfera politica mondiale e di una parte della comunità scientifica per la messa a punto di procedure efficaci per la riduzione dei fenomeni d'incidentalità e dei gravissimi danni derivanti su persone e cose. Le risorse economiche, impegnate per arginare il fenomeno, sono rivolte all'ottimizzazione dei costi d'intervento e alla massimizzazione dei benefici sociali.

Obiettivo di molti gruppi di ricerca internazionali e nazionali è, difatti, la valutazione dell'esistenza di legami tra le caratteristiche degli elementi geometrici, che compongono un tracciato stradale, ed i fattori di incidentalità. E' stato ampiamente provato che l'incremento del tasso d'incidentalità non è attribuibile alle sole caratteristiche di un elemento geometrico stradale, bensì anche all'ambiente nel quale esso stesso è inserito ed alle interconnessioni esistenti.

E' irrealistico per molti ricercatori considerare un'intersezione o una curva di piccolo raggio come elementi a forte

rischio, giacché potrebbero divenire solo se inseriti in un sistema con caratteristiche tali da indurre l'utente a sopportare una condotta non compatibile con il regime di sicurezza. L'utente, infatti, avendo percezione del rischio, derivante dall'ambiente attraversato, imposta la propria velocità di marcia e tende a conservarla sui tronchi stradali con caratteristiche simili.

Il desiderio, pertanto, di molti ricercatori impegnati nel campo della Progettazione Stradale è la definizione di criteri che concorrono alla costruzione di un tracciato omogeneo nel susseguirsi delle sue componenti geometriche verticali ed orizzontali.

Obiettivo primo di numerosi lavori scientifici in letteratura è la realizzazione di corridoi geometrici stradali sensibili al territorio attraversato, armoniosi in ogni loro componente, percepibili istante per istante dall'utente e conformi alle sue aspettative.

La Congruenza di un tracciato stradale è stata definita da NCHRP Report 502 [1] come il grado di rispondenza della

geometria e delle caratteristiche funzionali di una Infrastruttura alle previsioni del guidatore. Tali requisiti sono indispensabili per evitare l'insorgere di situazioni inaspettate che indurrebbero l'utente a continue variazioni di velocità tra successivi elementi, con il manifestarsi, pertanto, di situazioni di rischio.

Una verifica di congruenza di un tracciato stradale è attuabile, in ogni caso, solo se sono note le reali velocità di percorrenza degli elementi. Le metodologie, che prevedono l'utilizzo dei diagrammi di velocità operativa, sono ritenute dalla comunità scientifica sufficientemente attendibili per l'interpretazione del funzionamento del sistema uomo – strada – veicolo – ambiente.

L'INDOT Design Manual [2] raccomanda, per esempio, che le velocità di progetto degli elementi geometrici stradali, sono da scegliersi in base alla classifica funzionale della rete locale e generale cui l'arteria appartiene, alle peculiarità dell'ambiente coinvolto, ed ai volumi di traffico interessati.

Secondo l'AASHTO [3] la velocità di progetto di un elemento geometrico dovrebbe rispecchiare quella che l'utente attinge, più familiarmente, in sicurezza.

Molti lavori sperimentali hanno dimostrato che la velocità operativa, rappresentata da specifici percentili

della distribuzione delle velocità reali, stimi al meglio la condotta di guida degli utenti.

L'INDOT Design Manual definisce *velocità operativa* la più alta velocità con la quale gli utenti possono percorrere in sicurezza una strada senza eccederne i limiti di velocità.

L'AASHTO interpreta la velocità operativa come quella velocità attinta dagli utenti in condizioni di flusso libero.

Il percentile della distribuzione delle velocità reali, che interpreta in modo conveniente, come dimostrato da numerosi ricercatori [4], la reale condotta degli utenti, è l'85° percentile della distribuzione delle velocità - V_{85} -, stimato per le sole autovetture, in condizioni di flusso libero, in presenza di strada asciutta, condizioni di luce diurna e buone condizioni meteorologiche. Sebbene tale parametro sia largamente adottato, altri percentili sono stati suggeriti nel corso degli anni. A.M. Figueroa ed A. Tarko [5] [6] hanno proposto in Collaborazione con l'Indiana Department of Transportation e l'U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, per esempio, modelli di previsione della velocità su rettilineo e curva, non limitandosi ad un prefissato percentile bensì valutando tutti quelli dal 5° al 95° con incrementi di cinque. I risultati della ricerca, di considerevole rilevanza

normativi, sono stati introdotti dall'INDOT negli Standards Section of the Contract and Construction Division ed annessi all'INDOT Design Manual - Part V, Road Design.

La Sezione Strade del Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II" conduce dal 2003, nell'ottica di un perfezionamento degli Normative di settore italiane, una vasta campagna di sperimentazione su parte delle Strade Statali e Provinciali della viabilità ordinaria della Provincia di Salerno, esistenti prima dell'entrata in vigore del D.M. 5/11/2001 [7]. La campagna è rivolta al monitoraggio delle condizioni di traffico, rilievo delle velocità dei mezzi transitanti e delle caratteristiche geometriche e funzionali dei siti prescelti.

Obiettivo principale del corrente lavoro di ricerca, intitolato *Modelli per la costruzione del diagramma delle velocità operative su strade extraurbane a due corsie e ad accessibilità diffusa*, si focalizza sulla messa a punto di procedure per la costruzione di un profilo continuo delle velocità operative, capace di rappresentare il reale comportamento di

guida degli utenti su rettilineo, curva circolare e zona di transizione rettilineo - curva - rettilineo. Il diagramma delle velocità, indispensabile per le verifiche di congruenza dei tracciati stradali prescelti, è costruito con l'applicazione di quattro modelli predittivi della V_{85} , opportunamente calibrati, per rettilineo e curve circolari. I quattro modelli sono stati, opportunamente, tarati e validati su un campione significativo di strade extraurbane ad unica carreggiata localizzate in piano, prive di raccordi clotoideici orizzontali di transizione tra rettilineo e curva circolare. Questi restituiscono, per ogni generica sezione stradale e per senso di marcia, una stima della velocità operativa, alla quale è associata un grado d'indeterminatezza dovuto alla propagazione dell'errore dalle variabili d'ingresso indipendenti sul misurando.

La ricerca è stata anche indirizzata alla calibrazione e taratura di un modello di previsione della Congruenza dei Tracciati stradali, che restituisce con la una misura dell'omogeneità globale del Tracciato attraverso un unico parametro.

Risultati

I numerosi studi sulle velocità operative, proposti negli anni da molteplici gruppi di ricercatori

nazionali ed internazionali, hanno evidenziato l'effetto della variabilità della velocità tra i diversi siti geometrici

per l'influenza di fattori di natura non strettamente geometrica.

L'analisi sperimentale che si illustrerà in dettaglio nel corso del seguente manoscritto comprende due fasi: la prima riguarda l'identificazione delle zone di transizione, impegnate dai conducenti in decelerazione nel movimento di approccio - curva e/o in accelerazione in fase di allontanamento, mentre la seconda, riguarda la calibrazione, taratura e validazione di modelli predittivi della velocità operativa su rettilineo e curva con conseguente analisi di sensitività dei tracciati stradali prescelti.

I risultati ottenuti nella prima parte del lavoro di ricerca hanno restituito valori medi del tasso di accelerazione e decelerazione differenti dalla costante suggerita dal D.M. 5/11/2001 [7] ed una ripartizione percentuale delle distanze di transizione tra rettilineo e curva circolare. Si è proceduto anche alla formulazione, in prima analisi, di modelli di previsione dei tassi, in modo da chiarire le variazioni di velocità da sito a sito.

I risultati cui si è pervenuti nella seconda fase riguardano la costruzione di quattro differenti modelli di previsione della V_{85} attraverso tecniche di regressioni multiple non lineari: due per i rettilinei, rispettivamente con sviluppo inferiore e maggiore di 500 metri, e due per gli elementi curvilinei

circolari, rispettivamente per curve appartenenti a tronchi geometrici stradali con un tasso di variazione medio di curvatura maggiore e minore di 240 gon/km. I modelli evidenziano una forte relazione tra la velocità operativa, monitorata in sito, e le diverse caratteristiche di un tracciato stradale di *natura geometrica*, come il tasso di variazione di curvatura, la dimensione della sezione trasversale, lo sviluppo degli elementi, il raggio di curvatura, e di *natura non geometrica*, come la presenza d'intersezioni e la densità di accessi privati per chilometro. I risultati dell'indagine sperimentale provano la complessità e la variabilità dei comportamenti dei guidatori lungo i tronchi geometrici stradali esistenti, evidenziando la necessità di formulare una normativa di settore adeguata per le strade extraurbane in virtù dei forti scostamenti sussistono tra reale condotta dell'utente e le ipotesi semplificatrici da norma [7].

La verifica di omogeneità, prevista da norma [7], richiede la rappresentazione del diagramma delle velocità di progetto, al variare della progressiva stradale, e l'analisi per entrambi i sensi di marcia delle variazioni di velocità attinte tra due successivi elementi.

Trattandosi, quindi, di una verifica globale sulle scelte puntuali dei vari elementi, nel caso tali condizioni non siano soddisfatte, anche solo in singole

parti, occorrerà ridisegnare la geometria d'interi tratti.

Ne deriva, pertanto, la difficile pratica applicazione di queste procedure ad Infrastrutture esistenti, realizzate precedentemente all'entrata in vigore del D.M. 5/11/2001. Per queste si prefigura di difficile identificazione la velocità di progetto degli elementi componenti il tracciato, sottoposti negli anni ad innumerevoli interventi di adeguamento geometrico – funzionale per variazioni di traffico e destinazione d'uso.

L'analisi dei dati ed i risultati ottenuti confermano la rilevanza del tema di ricerca affrontato e le possibili pratiche applicazioni nella progettazione degli interventi di adeguamento della viabilità ordinaria esistente per il potenziamento funzionale ed il miglioramento del livello di sicurezza intrinseca.

Ringraziamenti

Il lavoro di ricerca sviluppato nel triennio del XXII Ciclo di Dottorato, in dettaglio illustrato nel corso del presente manoscritto, ha suscitato l'interesse e la partecipazione, in modo diretto ed indiretto, di molti che con saggezza, esperienza, pazienza ed affetto mi hanno affiancato.

Ringrazio il Prof. Ing. Renato Lamberti, Direttore del Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti "Luigi Tocchetti" dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II", per aver coordinato con grande saggezza e dedizione il mio percorso di Dottorato, per aver costantemente seguito gli sviluppi della mia ricerca, offrendomi una preziosa assistenza e spunti di riflessione.

Ringrazio il Prof. Ing. Tommaso Esposito, Decano del Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti "Luigi Tocchetti", che sempre mi ha offerto, nonostante la conclusione delle sue attività didattiche, gli strumenti della sua grande esperienza in materia, seguendo con passione i miei studi e dedicandomi parte del suo prezioso tempo per formulare proposte capaci di migliorare il lavoro di ricerca.

Grazie al mio Tutor, Prof. Ing. Gianluca dell'Acqua, per la sua immane pazienza e sempre eterna presenza nel mio percorso di Dottorato; grazie per l'indiscussa esperienza scientifica e professionale che sempre ha messo a mia disposizione; grazie per avermi insegnato l'importanza ed il senso critico della cooperazione in un'attività di lavoro sperimentale; grazie per l'entusiasmo che mi ha trasmesso nell'affrontare un percorso di ricerca sempre irto di difficoltà e di non semplice ed immediata soluzione.

Ringrazio il Prof. Ing. Raffaele Mauro della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Trento ed il Prof. Ing. Antonio Gesualdo del Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II" per il prezioso aiuto che sempre mi hanno offerto, per il proficuo scambio di idee e conoscenze, e per tutte le iniziative che mi hanno suggerito per migliorare scientificamente il lavoro.

Ringrazio il Prof. Mauro Catalani dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope", per essere sempre stato un riferimento importante nel mio percorso di Dottorato e nella vita personale.

Grazie a Giulio, Anna e Valentina per aver assecondato ogni mia richiesta nei momenti più difficili e per avermi offerto il loro aiuto ed amore in ogni circostanza.

Grazie ai miei genitori ed ai nonni per avermi donato la possibilità di portare avanti e concludere con serenità questo percorso di Studi così arduo ma affascinante.

Ringrazio l'Arch. Alfonso D'Angelo, l'Arch. Pasquale Gaito, il Geom. Franco D'Angelo e il Geom. Gerardo Tortora per essersi sempre prestati disponibili di fronte a ogni mia richiesta ed essersi continuamente rivelati un gruppo, pronto ad interloquire con me con pazienza e generosità.

Infine, ma non per ultimi, voglio ringraziare i miei amici e tutti quelli che durante questi anni sono sempre stati al mio fianco, tollerandomi.

Indice

CAPITOLO 1. INTRODUZIONE.....		6
1.1	BACKGROUND.....	6
1.2	PRESENTAZIONE DEL PROBLEMA DELLA RICERCA.....	10
1.3	OBIETTIVI E SCOPI	13
1.4	ORGANIZZAZIONE DELLA RICERCA.....	17
CAPITOLO 2. ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE.....		19
2.1	INTRODUZIONE	19
2.2	CARATTERISTICHE GEOMETRICHE STRADALI COME FATTORI DI VELOCITÀ	20
2.3	ANALISI DEL COMPORTAMENTO DI GUIDA DEGLI UTENTI SU RETTIFILO, CURVA E TRANSIZIONE RETTIFILO – CURVA – RETTIFILO	22
2.3.1	<i>Introduzione.....</i>	<i>22</i>
2.3.2	<i>Modelli di previsione delle velocità operative in Rettifilo.....</i>	<i>22</i>
2.3.3	<i>Analisi del Comportamento di guida degli utenti su Elementi Curvilinei Circolari</i> <i>.....</i>	<i>27</i>
2.3.3.1	Introduzione.....	27
2.3.3.2	Valutazione Stimatori Sintetici.....	28
2.3.3.3	Modelli di Previsione delle Velocità Operative su Curve Circolari.....	31
2.3.3.4	Stima dei Tassi di Decelerazione ed Accelerazione	35
2.3.4	<i>Modelli e metodi per la costruzione di un profilo completo delle velocità operative</i> <i>sull'intero sviluppo di un Tracciato geometrico stradale</i>	<i>46</i>
CAPITOLO 3. RETE DI STUDIO.....		54
3.1	INTRODUZIONE	54
3.2	STRADE MONITORATE E CARATTERISTICHE GEOMETRICHE RILEVATE	55
3.3	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	57
3.4	CAMPAGNA DI SEZIONAMENTO	59
3.4.1	<i>Introduzione.....</i>	<i>59</i>
3.4.2	<i>Scelta delle sezioni da monitorare.....</i>	<i>59</i>
CAPITOLO 4. COMPORTAMENTO DELL'UTENTE LUNGO I TRONCHI DI TRANSIZIONE.....		62
4.1	INTRODUZIONE	62
4.2	ANALISI DEI DATI	64
4.3	STIMA DEI TASSI DI DECELERAZIONE ED ACCELERAZIONE.....	68
4.3.1	<i>Prima Procedura d'analisi.....</i>	<i>68</i>
4.3.1.1	Analisi Statistica.....	73
4.3.2	<i>Seconda Procedura d'Analisi:</i>	<i>76</i>
	<i>Presenza di Anomalie nella Stima dei Tassi.....</i>	<i>76</i>
4.3.2.1	Introduzione.....	76
4.3.2.2	Stima dei Tassi di Decelerazione ed Accelerazione	77
4.3.2.3	Analisi Statistica dei Tassi di Decelerazione ed Accelerazione	81

4.4	MODELLI DI PREVISIONE DEI TASSI DI DECELERAZIONE ED ACCELERAZIONE	83
4.4.1	<i>Calibrazione e Taratura dei Modelli</i>	85
4.4.1.1	Modello di Previsione del Tasso di Decelerazione	85
4.4.1.1.1	Analisi Statistica dei Tassi di Decelerazione	91
4.4.1.2	Modello di Previsione del Tasso di Accelerazione	93
4.4.1.2.1	Analisi Statistica dei Tassi di Accelerazione	95
 CAPITOLO 5. MODELLI DI PREVISIONE DELLE VELOCITA' OPERATIVE		
5.1	INTRODUZIONE	97
5.2	MODELLI DI PREVISIONE DELLA V_{85} IN RETTIFILO	98
5.3	MODELLI DI PREVISIONE DELLA V_{85} SU ELEMENTI CURVILINEI CIRCOLARI	103
5.4	STIMA DELL'INCERTEZZA DEL MISURANDO V_{85}	107
5.4.1	<i>Valutazione dell'Incertezza tipo composta</i>	109
5.4.1.1	Propagazione dell'incertezza per grandezze non correlate	110
5.4.1.2	Propagazione dell'incertezza per grandezze correlate	111
5.4.1.2.1	Incertezza tipo composta dei Modelli di previsione della V_{85}	113
5.4.2	<i>Incertezza tipo estesa del misurando V_{85}</i>	115
5.4.2.1	Incertezza estesa dei Modelli di previsione della V_{85} su rettifili	116
5.4.2.2	Incertezza estesa dei Modelli di previsione della V_{85} in curva	119
5.5	VALIDAZIONE MODELLI DI PREVISIONE DELLA V_{85} IN RETTIFILO E CURVA	122
 CAPITOLO 6. ANALISI DI SENSITIVITA'		
CALIBRAZIONE DI UN MODELLO DI PREVISIONE DELLA CONGRUENZA DEI TRACCIATI STRADALI ESISTENTI		
6.1	INTRODUZIONE	131
6.2	METODOLOGIE PRESENTI IN LETTERATURA	131
6.3	MODELLO DI PREVISIONE DELLA CONGRUENZA DEI TRACCIATI STRADALI ESISTENTI	135
 CAPITOLO 7. PROCEDURA DI APPLICAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI E SVILUPPI DELLA RICERCA		
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI		
APPENDICE A		
STRALCI CARTOGRAFICI		
APPENDICE B		
VALUTAZIONE INCERTEZZA TIPO COMPOSTA ED ESTESA DEL MISURANDO V_{85}		

Lista delle Tabelle

Tabella 1_Tipologie di Modelli di Previsione della Velocità in rettilineo.....	23
Tabella 2_ Definizioni delle Variabili Indipendenti riportate in Tabella 1	24
Tabella 3_ Tipologie Modelli di previsione della velocità in curva	31
Tabella 4_ Definizione delle Variabili Indipendenti poste in Tabella 3	34
Tabella 5_Modello di decelerazione proposto da Fitzpatrick [10]	38
Tabella 6_ Procedura per la valutazione delle zone di transizione [63]	42
Tabella 7_ Modelli di previsione della V_{85} in curva	51
Tabella 8_Caratteristiche Infrastrutture esaminate.....	62
Tabella 9_Statistica delle Caratteristiche dei rettilineari esaminati.....	63
Tabella 10_Statistica delle Caratteristiche delle Curve Circolari esaminate	63
Tabella 11_Tassi di decelerazione ed accelerazione e lunghezza dei tronchi di transizione	71
Tabella 12_ t-tests Tassi di Decelerazione.....	75
Tabella 13_ t-tests Tassi di Accelerazione.....	75
Tabella 14_ Stima Tassi di Decelerazione (I Gruppo).....	77
Tabella 15_ Stima Tassi di Decelerazione (II Gruppo).....	78
Tabella 16_ Stima Tassi di Accelerazione (I Gruppo).....	79
Tabella 17_ Stima Tassi di Accelerazione (II Gruppo)	80
Tabella 18_ t-Tests Tassi di Decelerazione I Gruppo	82
Tabella 19_ t-Tests Tassi di Decelerazione II Gruppo.....	82
Tabella 20_ t-Tests Tassi di Accelerazione I Gruppo.....	82
Tabella 21_ t-Tests Tassi di Accelerazione II Gruppo	82
Tabella 22_Statistica modello per tassi di dec. con $CCR_s < 320$ gon/km e $L_{RP} > 78$ m..	87
Tabella 23_Tronco di Transizione L_d per siti con $CCR_s < 320$ gon/km e $L_{RP} > 78$ m..	87
Tabella 24_Tronco di Transizione L_d per siti con $CCR_s < 320$ gon/km e $35m < L_{RP} <$ $78m$	88
Tabella 25_Statistica modello per tassi di dec. con $320\text{gon/km} < CCR_s < 635$ gon/km e $L_{RP} > 50m$	89
Tabella 26_Tronco di Transizione L_d per siti con $320\text{gon/km} < CCR_s < 635$ gon/km e $L_{RP} > 50m$	89
Tabella 27_Tronco di Transizione L_d per siti 320 gon/km $< CCR_s < 635$ gon/km e L_{RP} < 50 m	90
Tabella 28_ d e L_d per siti con $CCR_s > 636$ gon/km e $L_{RP} > 180$ m.....	91
Tabella 29_ d e L_d per siti con $CCR_s > 636$ gon/km e 40 m $< L_{RP} < 180$ m	91

Tabella 30_ t-test Tassi di Decelerazione con $CCR_s < 320$ gon/km e $L_{RP} < 78$ m	91
Tabella 31_ t-test Tassi di Decelerazione con 320 gon/km $< CCR_s < 635$ gon/km e L_{RP} < 50 m	92
Tabella 32_ t-test Tassi di Decelerazione con $CCR_s > 635$ gon/km e $L_{RP} > 180$ m.....	92
Tabella 33_ t-test Tassi di Decelerazione con $CCR_s > 635$ gon/km e $L_{RP} < 180$ m.....	92
Tabella 34_ Statistica modello tassi di acc. per siti con $L_{RP} > 283$ m	94
Tabella 35_ Tronco di Transizione L_a per siti con $L_{RP} > 283$ m	94
Tabella 36_ a e L_a per siti con 37 m $< L_{RP} < 283$ m	95
Tabella 37_ a e L_a per siti con $L_{RP} \leq 37$ m	95
Tabella 38_ t-test Tassi di Accelerazione con 37 m $< L_{RP} < 283$ m.....	96
Tabella 39_ t-test Tassi di Accelerazione con $L_{RP} < 37$ m	96
Tabella 40_ Statistica del Modello di previsione della V_{85} su rettili con $L > 500$ m	100
Tabella 41_ Statistica del Modello di previsione della V_{85} su rettili con $L < 500$ m	102
Tabella 42_ Statistica del Modello di previsione della V_{85} su curve con $CCR_m > 240$ gon/km	104
Tabella 43_ Statistica del Modello di previsione della V_{85} su curve con $CCR_m < 240$ gon/km	106
Tabella 44_ Statistica delle caratteristiche dei rettili sulla S.P. 135 ed S.S. 103	123
Tabella 45_ Statistica delle caratteristiche delle curve circolari sulla S.P. 135 ed S.S. 103	123
Tabella 46_ Residui Modello di previsione V_{85} su rettili con $L > 500$ m.....	124
Tabella 47_ Residui Modello di previsione V_{85} su rettili con $L < 500$ m.....	125
Tabella 48_ Residui Modello di previsione V_{85} su curve circolari con $CCR_m > 240$ gon/km	127
Tabella 49_ Residui Modello di previsione V_{85} su curve circolari con $CCR_m < 240$ gon/km	129
Tabella 50_ Validazione : Parametri Statistici Sintetici dei quattro modelli predittivi della V_{85}	130
Tabella 51_ Primo criterio di Lamm, tratto da [71].....	132
Tabella 52_ Secondo criterio di Lamm, tratto da [71]	133
Tabella 53_ Terzo criterio di Lamm, tratto da [71]	133
Tabella 54_ Caratteristiche di Congruenza degli otto tracciati stradali analizzati	138
Tabella 55_ Secondo Criterio di Lamm applicato alla S.S. 103 in direzione delle chilometriche decrescenti.....	139
Tabella 56_ Valutazione della Congruenza geometrica secondo i Limiti di variazione dell'intervallo $[R_a ; s]$	142

Tabella 57_ Congruenza dei tracciati secondo i limiti fissati all'intervallo $[R_a; s]$	143
Tabella 58_ Congruenza geometrica secondo i Limiti di variazione della variabile C ..	144
Tabella 59_ Definizione A e B per la taratura del modello predittivo della Congruenza C	144

Lista delle Figure

Figura 1_Sintesi degli Obiettivi del Programma di Ricerca	15
Figura 2_Organizzazione del Manoscritto.....	17
Figura 3_ Piano di sezionamento dell'Università dell'Alabama e della Pensilvania.....	28
Figura 4 _ Suddivisione per classi dei Modelli di previsione della V_{85} in curva da Letteratura	35
Figura 5_Piano di sezionamento e Profilo di velocità [47]	37
Figura 6_ Posizione strumento per rilievo delle velocità [63]	40
Figura 7_ Esempio di Diagramma delle velocità in approccio – curva [63]	40
Figura 8_ Tipologie di Profili di velocità operativa [63].....	41
Figura 9_ Profilo dei tassi di Decelerazione [63]	44
Figura 10_ Aerofotogrammetria delle Strade esaminate	56
Figura 11_Procedure di Rilevamento	58
Figura 12_Stralcio Cartografico Piano di Sezionamento.....	60
Figura 13_Piano Tipo di Sezionamento lungo le Transizioni.....	63
Figura 14_ Stralcio del profilo delle velocità operative sulla S.P.312 ed esempio di individuazione del tronco di transizione per la curva con raggio di 100 metri	64
Figura 15_Curva con Raggio pari a 60 m sulla S.S.426	65
Figura 16_Curva con Raggio pari a 100 m sulla S.P.262	66
Figura 17_Curva con Raggio pari a 100 m sulla S.P.52.....	66
Figura 18_Curva con Raggio pari a 250 m sulla S.S.426.....	67
Figura 19_Curva con Raggio pari a 190 m sulla S.S.426.....	67
Figura 20_ Carta di Controllo Statistico dei Tassi di Decelerazione.....	72
Figura 21_Carta di Controllo Statistico dei Tassi di Accelerazione	72
Figura 22_ Carta di Controllo Statistico dei Tassi di Decelerazione (I Gruppo)	77
Figura 23_ Carta di Controllo Statistico dei Tassi di Decelerazione (II Gruppo)	78
Figura 24_ Carta di Controllo Statistico dei Tassi di Accelerazione (I Gruppo).....	79
Figura 25_ Carta di Controllo Statistico dei Tassi di Accelerazione (II Gruppo).....	80
Figura 26_Carta di Controllo Tassi dec. per siti con $CCR_s < 320$ gon/km e $L_{RP} > 78$ m	86
Figura 27_ Diagramma di Performance modello (34) con $CCR_s < 320$ gon/km e $L_{RP} > 78$ m	87
Figura 28_Carta di Controllo tassi dec. siti con $320 \text{ gon/km} < CCR_s < 635$ gon/km e $L_{RP} > 50$ m.....	88
Figura 29_ Diagramma di Performance (35)con $320 \text{ gon/km} < CCR_s < 635$ gon/km e $L_{RP} > 50$ m.....	90

Figura 30_Carta di Controllo Tassi acc. per siti con $L_{RP} > 283$ m	93
Figura 31_Diagramma di Performance del modello (36) per siti con $L_{RP} > 283$ m.....	94
Figura 32_Carta di Controllo Statistico delle V_{85} rilevate su rettifili con $L > 500$ m	99
Figura 33_Diagramma di Performance del Modello (37) per rettifili con $L > 500$ m...	101
Figura 34_Carta di Controllo Statistico delle V_{85} rilevate su rettifili con $L < 500$ m ...	101
Figura 35_Diagramma di Performance del Modello (38) per rettifili con $L < 500$ m...	102
Figura 36_Carta di Controllo Statistico delle V_{85} su curve con $CCR > 240$ gon/km ...	103
Figura 37_Diagramma di Performance del Modello (39) per curve con $CCR_m > 240$ gon/km	105
Figura 38_Carta di Controllo Statistico delle V_{85} su curve con $CCR < 240$ gon/km ...	105
Figura 39_Diagramma di Performance del Modello per curve con $CCR_m < 240$ gon/km	107
Figura 40_Legame tra livello di confidenza e k (Modello V_{85} su rettifili con $L > 500$ m)	117
Figura 41_Legame tra $U(y)$ e k per Modello di previsione V_{85} su rettifili con $L > 500$ m	117
Figura 42_Legame tra livello di confidenza e k (Modello V_{85} su rettifili con $L < 500$ m)	118
Figura 43_Legame tra $U(y)$ e k per Modello di previsione V_{85} su rettifili con $L < 500$ m	118
Figura 44_Legame tra livello di confidenza e k (Modello V_{85} su curve con $CCR_m > 240$ gon/km).....	119
Figura 45_Legame tra $U(y)$ e k per Modello di previsione V_{85} su curve con $CCR_m > 240$ gon/km	120
Figura 46_Legame tra livello di confidenza e k (Modello V_{85} su curve con $CCR_m < 240$ gon/km).....	121
Figura 47_Legame tra $U(y)$ e k per Modello di previsione V_{85} su rettifili con $CCR_m <$ 240 gon/km	121
Figura 48_Carta di Controllo Statistico degli errori per Modello su rettifili con $L > 500$ m	124
Figura 49_Diagramma di Performance del Modello predittivo su rettifili con $L > 500$ m	125
Figura 50_Carta di Controllo Statistico degli errori per Modello su rettifili con $L < 500$ m	126
Figura 51_Diagramma di Performance del Modello predittivo su rettifili con $L < 500$ m	126

Figura 52_ Carta di Controllo Statistico errori per Modello curve con $CCR_m > 240$ gon/km	128
Figura 53_ Diagramma di Performance Modello predittivo curve con $CCR_m > 240$ gon/km	128
Figura 54_ Carta di Controllo Statistico errori per Modello curve con $CCR_m < 240$ gon/km	130
Figura 55_ Esempio Distribuzione Velocità per differenti postazioni sul tronco di Transizione	135
Figura 56_ Profilo di Velocità operativa su S.S.103 e misure di congruenza	137
Figura 57_ Congruenza versus R_a per cinque differenti valori di s.....	145
Figura 58_ Profilo di Velocità operativa su S.P.52 e misure di congruenza	145
Figura 59_ Profilo di Velocità operativa su S.P.135 in direzione 0.....	150
Figura 60_ Profilo di Velocità operativa su S.P.135 in direzione 1.....	151

CAPITOLO 1. INTRODUZIONE

1.1 Background

La rete stradale italiana esistente, secondo quanto chiarito nella *Bozza per gli Interventi di Adeguamento delle strade esistenti* del 21 Marzo 2006 [8], gode di un elevato sviluppo planimetrico con caratteristiche geometriche, funzionali e di traffico multiformi, definite con criteri e standard progettuali in taluni casi molto diversi e non abbastanza congruenti alle condizioni d'impiego attuali [7]. La *Bozza* [8], secondo le disposizioni del D.M. 22/04/2004 [9], disciplina, anche se a carattere non cogente, i criteri per la progettazione ed esecuzione degli interventi di adeguamento, strutturali e non, della rete stradale esistente, purché debitamente approvati ed inseriti negli strumenti di pianificazione e programmazione degli enti proprietari e/o gestori. Essi sono improntati al miglioramento della funzionalità operativa e della sicurezza delle strade, nel rispetto degli esistenti vincoli ambientali, archeologici, paesaggistici ed economici.

Gli Enti gestori, nel fronteggiare le mutevoli condizioni di esercizio, hanno predisposto negli anni interventi di adeguamento basati su indirizzi e criteri spesso condizionati dalle caratteristiche delle infrastrutture su cui si operava, differenziate per conformazione, contesto fisico e periodo di costruzione. Ciò ha prodotto l'insorgere, in qualche caso, di elementi di disomogeneità nella composizione dello spazio stradale, con particolare incremento nella viabilità secondaria, ove le interazioni con il contesto territoriale attraversato, naturale ed antropizzato si presentano numerose [8].

La ricerca internazionale e nazionale, impegnata da tempo sul tema della sicurezza stradale, sta indagando, nel processo di programmazione degli interventi infrastrutturali di una Rete viaria, quali possano essere le soluzioni strutturali e non strutturali più economicamente e socialmente vantaggiose, per ridurre il fenomeno dell'incidentalità a livelli ritenuti accettabili dall'utenza. In particolare, negli ultimi anni gli esperti hanno approfondito la conoscenza del rapporto "uomo - via", alla ricerca di una chiave di lettura delle dinamiche che si sviluppano su strada e che consentono di spiegare le cause della condotta di guida pericolosa degli utenti. Ne consegue che l'analisi dei problemi riguardanti le infrastrutture viarie, siano essi relativi alla progettazione geometrica o alla programmazione degli interventi di adeguamento, si è trasferita dal campo della fisica dei modelli semplificati all'ambito dello studio dei comportamenti dei guidatori.

La locuzione "*comportamento del guidatore*" indica l'insieme delle variazioni di performance di un uomo, manifestate lungo la traiettoria percorsa, eseguite come

reazione agli stimoli interni ed esterni subiti durante la guida. Da un punto di vista cinematico è possibile assimilare le reazioni del guidatore ad una continua modifica di intensità e di direzione del vettore velocità; il “*comportamento*”, di conseguenza, può essere analizzato attraverso la conoscenza delle velocità attuate e delle variazioni sviluppate a stimoli ambientali. A tale proposito, numerosi studi sperimentali hanno evidenziato come la repentina e continua variazione del vettore velocità sia causa di un aumento della probabilità del verificarsi di sinistri stradali, derivanti dall’assenza di riscontro tra le aspettative dei guidatori e la qualità dell’offerta del tracciato.

In realtà, l’opportunità da parte degli utenti di “filtrare” ed “elaborare” le informazioni percepite durante il moto, discende anche dalla capacità del tracciato di trasferirle grazie alla presenza di omogeneità nel susseguirsi armonico ed ordinato delle sue componenti. La velocità, quindi, per una larga fetta della comunità scientifica tenderebbe a spiegare buona parte dei fenomeni che prendono vita su un’Infrastruttura stradale.

L’American Association of State Highways and Transportation Officials [3] definisce la velocità di progetto come parametro - guida per la definizione delle caratteristiche geometriche dei vari elementi che compongono il tracciato stradale. In particolare è precisato che tale grandezza deve essere garante di sicurezza e comfort di marcia ed essere sensibilmente prossima alla velocità che i guidatori aspettano di attingere sotto condizioni di traffico, ambientali ed infrastrutturali regolari.

Alcuni studiosi hanno indagato le possibili cause che possono limitare l’uso della velocità di progetto così come definita dall’AASHTO; tra questi è presente una ricerca condotta da Fitzpatrick et al. [10] dove si richiede di sostituire tale parametro con la velocità operativa nel dimensionamento delle sezioni geometriche in rettilo e curva di ampio raggio, perché più rispondente alla realtà.

Krammes et al. [11] hanno appurato, a seguito di indagini sperimentali, l’esistenza di una forte discrepanza tra velocità di progetto ed operativa: sono state rilevate misure di velocità in rettilo e curva su 12 strade extraurbane, dove le velocità di progetto fissate dagli Standards oscillavano tra gli 80 km/h e i 110 km/h. I rilievi hanno mostrato che, laddove le velocità di progetto si presentavano a 80 km/h, l’85° percentile della distribuzione delle velocità è, in ogni sezione monitorata, sempre più alto.

Mc Lean [12] confermò gli stessi risultati su strade extraurbane localizzate in Australia; dimostrò che l’85° percentile della distribuzione delle velocità su curve con velocità di progetto uguale od inferiore a 90 km/h era sempre superiore.

NCHRP Report 504 [13] ha posto l'accento sull'enorme confusione che spesso insorge, in molti Paesi stranieri nella fase preliminare di progettazione di una infrastruttura viaria, nel processo di applicazione dei differenti concetti di velocità (velocità di progetto, velocità operativa, velocità ambientale, velocità desiderata, ecc.). Gli studiosi hanno rimarcato, nel corso del manoscritto, la fragile relazione tra la velocità di progetto e quella operativa nelle reali condizioni di marcia dell'utente.

Le molteplici definizioni ed utilizzazioni della velocità invitano, pertanto, a riflettere su come sia inappropriato operare sulle strade italiane esistenti, realizzate cioè prima dell'entrata in vigore del D.M. 5/11/2001 [7], con la velocità di progetto essendo ampiamente inferiore alla velocità operativa V_{85} e difficilmente individuabile.

Numerosi studi sono stati condotti in diversi Paesi e su differenti tipologie di strada per determinare, sulla base di analisi statistiche, i legami esistenti tra velocità operativa e caratteristiche infrastrutturali; alcuni dei risultati sono poi confluiti nell'impianto normativo sotto forma di norme e regolamenti a supporto dei progettisti.

Le normative internazionali di settore non propongono, tuttavia, la medesima definizione di velocità per il dimensionamento geometrico e funzionale degli elementi componenti il tracciato [14].

La *normativa svizzera* [15] adotta la velocità di progetto in due circostanze: la prima relativa alla costruzione del diagramma delle velocità al fine di verificare la congruenza dei tracciati per le sole strade extraurbane quando il limite è superiore a 50 km/h; la seconda per il dimensionamento di alcune caratteristiche geometriche quali il raggio minimo della curva. Per assicurare, inoltre, all'utente una corretta percezione dell'elemento curvilineo, la normativa fissa una minima lunghezza dell'arco di cerchio funzione della velocità di progetto. Questa lunghezza corrisponde ad un tempo di percorrenza e ad un angolo di deviazione, che variano rispettivamente da 2,25 secondi e $31,85^\circ$ per l'arco percorso a 25 km/h, a 6,90 secondi e $20,27^\circ$ per l'arco percorso a 120 km/h. Le relazioni ricavate sono presentate sotto forma di abaco, dove ai valori della velocità di progetto, compresi tra 40 km/h e 120 km/h, si associa il raggio di curvatura corrispondente.

L'edizione della *normativa australiana* attualmente in vigore [16] prevede un processo iterativo di verifica della compatibilità tra i diversi elementi geometrici del tracciato. Il procedimento prevede l'elaborazione di un tracciato di primo tentativo con l'identificazione della velocità ambientale, che equivale al massimo valore raggiunto dall'85° percentile della distribuzione delle velocità dei veicoli isolati, sul più lungo rettilineo o curva di ampio raggio. Questa velocità, secondo le norme, rappresenta la velocità "desiderata" sui tronchi stradali omogenei. È possibile desumere attraverso un

diagramma la velocità di progetto delle singole curve, pari all'85° percentile della distribuzione delle velocità reali, in funzione della velocità ambientale, misurata sul tronco omogeneo al quale la curva appartiene, e del raggio di curvatura.

La *normativa tedesca* [17], pubblicata nel 1995, riprende in modo sostanzialmente immutato l'impostazione dell'edizione precedente redatta nel 1984. La velocità di progetto, funzione della categoria della strada, è adottata per stimare i valori minimi delle caratteristiche geometriche del tracciato, mentre la velocità operativa per la verifica della congruenza, per il calcolo della pendenza trasversale e della distanza di visibilità. I risultati delle analisi sperimentali evidenziarono su strade extraurbane ad unica carreggiata che, una volta ottenuta la tortuosità media dei vari tratti omogenei, era possibile valutare la corrispondente velocità operativa costante, utilizzando un apposito diagramma. Per le strade extraurbane a due o più corsie per senso di marcia, al contrario, fu adottato [18] un sistema empirico per il calcolo della V_{85} : per velocità di progetto $V_P \leq 100$ km/h la velocità operativa è pari a $V_P + 20$ Km/h, mentre per $V_P > 100$ km/h la velocità operativa è pari a $V_P + 10$.

La *normativa francese* è stata pubblicata nel 1994 ed ha sostituito la precedente edizione del 1970 [19] rispetto alla quale presenta un'impostazione completamente diversa sulle regole da applicare per la verifica di compatibilità della sequenza degli elementi geometrici e sulle distanze di visibilità in prossimità di curve ed incroci, per le quali viene introdotto il concetto di velocità operativa [20]. Sulla base dei risultati di uno studio sperimentale condotto in Francia alla fine degli anni novanta [21], è stato possibile calcolare la V_{85} in funzione del raggio di curvatura, della pendenza longitudinale e della dimensione della sezione trasversale. La velocità V_{85} interviene quindi in due sole raccomandazioni: lunghezza del rettifilo interposto tra due curve nello stesso senso di marcia, e distanza di visibilità all'ingresso della curva.

L'attuale *normativa inglese* TD 9/93 [55] è un semplice aggiornamento della precedente ed innovativa TD 9/81 che ha introdotto l'utilizzo della velocità operativa - V_{85} - come funzione lineare della velocità operativa media V_{50} ($V_{85} = 1,19 \cdot V_{50}$). In seguito, sono state previste procedure di verifica interattiva per l'analisi di congruenza dei tracciati in termini di differenza di velocità.

La *normativa italiana* [7] ha recepito parte delle linee - guida tedesche e svizzere, specialmente per quanto riguarda alcuni concetti legati all'omogeneità dei tracciati già introdotti nel B.U. CNR 78/80 [22], alla definizione dello sviluppo degli elementi componenti e alla costruzione del diagramma delle velocità. La struttura portante della nuova Norma è simile a quella del B.U. CNR 78/80 e ciò, probabilmente, per non disorientare eccessivamente i progettisti che avevano utilizzato le precedenti

disposizioni tecniche. A differenza delle Normative Straniere, quella Italiana non introduce, affatto, la velocità operativa nel dimensionamento e/o nella verifica del tracciato. Queste problematiche sono state ampiamente discusse negli ambienti scientifici ed hanno avuto il merito di orientare le linee di ricerca verso l'analisi dell'affidabilità del sistema "Strada - Veicolo - Guida - Ambiente". I filoni di ricerca più importanti, nati per rispondere a questa esigenza, possono essere ricondotti agli studi sull'omogeneità del tracciato, sui fattori umani, sui safety audits, e sulle moderne analisi d'incidentalità [23] [24] [25]. Tuttavia, la Bozza per gli interventi di Adeguamento delle strade esistenti [8] nel definire i criteri di progettazione degli interventi per il miglioramento della funzionalità e della sicurezza, introduce il concetto di "velocità operativa" come la velocità mantenuta dai veicoli in condizioni di flusso libero, superata solo dal 15% degli utenti e denominata anche V_{85} .

1.2 Presentazione del Problema della Ricerca

Negli ultimi anni principi di progettazione stradale *context – sensitive* sono stati ampiamente promossi da numerosi gruppi di ricercatori internazionali e nazionali. L'obiettivo è la formulazione di criteri di dimensionamento geometrico dei vari elementi di un tracciato stradale più vicini al reale comportamento di guida dell'utente e a tutti gli impatti derivanti da un intervento di natura ambientale, scenica, di traffico, storica e morfologica [5].

Le caratteristiche piano - altimetriche dei tracciati stradali, le specificità del veicolo in marcia, le ragioni dello spostamento, le caratteristiche ambientali e di traffico, i limiti di velocità nonché le peculiarità della zona esaminata sono le principali caratteristiche prese in esame per la valutazione del comportamento degli utenti, come illustrato da numerosi lavori presenti nella letteratura scientifica. L'intento è la messa a punto di procedure che assicurino un susseguirsi delle varie componenti di un tracciato stradale in maniera armoniosa, al fine di renderne facile ed immediata la percezione da parte dell'utente in marcia [2]. L'uomo, infatti, con la propria condotta di guida e nella sua percezione e reazione agli stimoli esterni, è il principale responsabile della sicurezza nella circolazione.

La sequenza degli elementi geometrici lungo il tracciato è di fondamentale rilevanza poiché, laddove non corrisponda alle attese dell'utente, l'attività di guida del conducente diventa più complessa, i tempi di percezione e reazione aumentano e la

risposta può risultare inadeguata anche in condizioni psico - fisiche normali, generando comportamenti potenzialmente pericolosi.

Dagli studi disponibili in letteratura emerge che la velocità, con la quale il conducente percorre un dato elemento geometrico o un tratto omogeneo di strada, consente di “spiegare” buona parte del rapporto uomo - via, di valutare e di esprimere giudizi circa la bontà di un progetto geometrico stradale e di formulare procedure di verifica della congruenza dei tracciati stradali esistenti.

La Congruenza dei Tracciati stradali, influente sulla sicurezza e comfort di marcia, è definita in Letteratura [1] come il grado di rispondenza della geometria stradale e delle caratteristiche funzionali alle attese del conducente. Due questioni hanno sempre animato il mondo scientifico nella sua valutazione: discrepanza tra velocità operativa e velocità di progetto, e riduzione di velocità nel passaggio tra successivi elementi geometrici [26].

La costruzione dei profili di velocità operativa è stata negli anni promossa dal mondo scientifico come valido strumento pratico per la valutazione dell'omogeneità di un tracciato stradale e per la determinazione dell'impatto dei progetti sulla viabilità.

Numerose attività di ricerca hanno rilevato che gli utenti preferiscono sacrificare più frequentemente il comfort e la sicurezza di marcia, piuttosto che accettare, passivamente, il “disagio” di una velocità d'avanzamento ridotta a causa di anomalie nel tracciato. In letteratura si ritrovano innumerevoli modelli di previsione della velocità operativa funzione di parametri legati non necessariamente alle caratteristiche geometriche del tracciato.

L'85° percentile della distribuzione delle velocità in condizione di flusso libero, strada asciutta, buone condizioni meteorologiche e luce diurna - V_{85} - è tipicamente usato come parametro rappresentativo della velocità operativa, così come suggerito dal Manual on Uniform Traffic Control Device [27] e dall'AASHTO [3].

Fitzpatrick et al. [10] hanno sviluppato, per esempio, una serie di modelli di previsione dell'85° percentile della distribuzione delle velocità in condizioni di flusso libero su strade extraurbane, impiegando il raggio di curvatura orizzontale e la pendenza longitudinale per diverse combinazioni di profili altimetrici e planimetrici.

Sebbene l'85° percentile della distribuzione delle velocità reali sia il parametro maggiormente impiegato per la stima delle velocità sui tonchi di strada extraurbana, altre formulazioni sono state proposte in letteratura per la previsione di differenti percentili che ben rappresentano il reale comportamento di guida di gran parte dei conducenti osservati [5] [13] [28] [29] [30].

Si comprende, dunque, come uno degli scopi della ricerca attuale sia la definizione di criteri e metodologie, con l'impiego delle velocità operative, per l'interpretazione e l'analisi della reale condotta di guida degli utenti, ed il successivo accertamento della presenza di omogeneità sull'intero sviluppo del tracciato stradale con riguardo alle aspettative dei conducenti.

L'analisi sperimentale condotta ha interessato otto Strade extraurbane a singola carreggiata localizzate in piano, appartenenti alla viabilità ordinaria della Rete della Provincia di Salerno; tutte le infrastrutture selezionate sono state realizzate prima dell'entrata in vigore del D.M.5/11/2001 [7] e sono prive di raccordi clotoidici planimetrici di transizione rettilineo – curva - rettilineo. La campagna di monitoraggio, che ha interessato il campione di strade prescelto, è stata opportunamente progettata per le finalità cui la ricerca si rivolge, con l'obiettivo di rilevare la condotta degli utenti su tronchi geometrici in rettilineo, su curve circolari, e sulle zone di transizione impegnate per decelerare nella fase d'ingresso – curva e/o accelerare nella fase di allontanamento.

Il Decreto Ministeriale 5/11/2001 [7] definisce, per le infrastrutture da realizzarsi, un Intervallo di Velocità di Progetto per la determinazione delle caratteristiche dei vari elementi che compongono il tracciato. Il termine "intervallo di velocità di progetto" indica quel campo di valori in base al quale si definiscono le proprietà delle varie componenti geometriche ed il progettista può adeguare con una certa flessibilità il tracciato al territorio attraversato. La verifica di omogeneità, che la norma richiede, consta della rappresentazione del diagramma delle velocità di progetto e dell'analisi, per entrambi i sensi di marcia, delle variazioni di velocità attinte tra due elementi successivi. Trattandosi, quindi, di una verifica globale sulle scelte puntuali dei vari elementi, nel caso tali condizioni non siano soddisfatte, anche solo in singole parti, occorrerà ridisegnare la geometria d'interi tratti. Ne deriva, pertanto, la difficile pratica applicazione di queste procedure ad infrastrutture esistenti, in quanto si prefigura di difficile individuazione la velocità di progetto dei singoli elementi del tracciato che negli anni sono stati sottoposti ad innumerevoli interventi di adeguamento geometrico – funzionale.

Le numerose ricerche, presenti nella letteratura scientifica, evidenziano da un lato che le velocità di progetto non consentono di definire quanto un tracciato sia abbastanza sicuro, dall'altro l'impossibilità di verificare correttamente con i soli criteri di Lamm [31] quanto sia omogeneo. Tali criteri si limitano, infatti, alla sola verifica delle differenze di velocità ed aderenza trasversale tra coppie di elementi successivi.

In definitiva, i tradizionali principi della progettazione stradale, pur se fondati su osservazioni teoriche e analitiche di generale validità, non sono in grado di rappresentare le differenze decisionali tra i diversi utenti.

Nasce da ciò l'esigenza di studiare le infrastrutture viarie attraverso un approccio analitico – deduttivo ed “induttivo”, basato sull'inferenza delle scelte operate dagli utenti.

I moderni mezzi di acquisizione ed elaborazione dei dati, unitamente ai metodi messi a disposizione dalle scienze statistiche, consentono di formulare modelli che correlano le caratteristiche della strada all'effettivo comportamento del guidatore attraverso la velocità operativa. Analisi rivolte, pertanto, all'interpretazione del comportamento degli utenti al variare del sito geometrico ed utilizzo di approcci di modellazione diversi dall'ordinaria regressione lineare per la calibrazione delle equazioni, sono da preferirsi. In tal modo, il tracciato stradale è concepito intessendo uno stretto rapporto tra andamento geometrico ed aspettative dell'utente, condizione essenziale per una progettazione moderna ed omogenea.

1.3 Obiettivi e Scopi

Il presente Lavoro di Ricerca illustra le metodologie utilizzate, le procedure ideate, le elaborazioni condotte ed i risultati ottenuti per la messa a punto di procedure che consentono la costruzione finita di un profilo continuo delle velocità operative, capace di rappresentare, nella fase di progettazione preliminare delle infrastrutture viarie, il reale comportamento di guida degli utenti su strade che attraversano l'ambito extraurbano, con particolare riferimento, anche, alla generica sezione. Tale Obiettivo concorre alla definizione di criteri e procedure per le verifiche della Congruenza dei Tracciati stradali esistenti. L'ultima fase del Programma di Ricerca si è incentrata, infatti, sulla calibrazione di un modello predittivo dell'omogeneità dei tracciati stradali, attraverso un'analisi di sensitività che definisce con un unico parametro la misura della Congruenza globale.

Il Decreto Ministeriale 5/11/2001 [7] dichiara, in maniera molto concisa, che gli interventi sulle Strade esistenti, per il potenziamento funzionale della sicurezza e miglioramento della Congruenza, vanno eseguiti adeguando alle presenti norme, per quanto possibile, le caratteristiche geometriche delle Stesse, in modo da soddisfare, nella maniera migliore, le esigenze della circolazione. La transizione tra tratti adeguati e tratti in cui l'adeguamento è stato ritenuto non possibile dovrà essere, poi, convenientemente

risolta per evitare l'introduzione di ulteriori situazioni di pericolo. Rimane, inoltre, ai progettisti la possibilità di proporre soluzioni innovative, rispetto alle seguenti norme, con l'obbligo che esse debbano venir comunque approvate secondo le modalità precisate all'art. 13 del Codice.

La Bozza per gli Interventi di Adeguamento delle Strade esistenti [8], cui si è in precedenza fatto ampiamente riferimento, spiega le regole da seguire per la progettazione ed esecuzione degli interventi che possono trovare attuazione anche per fasi successive, secondo un preciso programma temporale, sia sull'intero sviluppo di tronchi stradali (interventi generalizzati), sia su singoli tratti o intersezioni (interventi localizzati). Gli interventi possono interessare sia la realtà fisica dell'infrastruttura (interventi "strutturali"), sia le sue modalità d'uso, in termini di limitazione dell'utenza ammessa, modifica delle attrezzature ed impianti a servizio della circolazione, definizione di piani di gestione della circolazione e delle emergenze (interventi "non strutturali"). Le soluzioni di adeguamento possibili in ciascuno specifico caso possono essere in genere molteplici, ciascuna composta da un bilanciato insieme di interventi e provvedimenti di natura "strutturale" e "non strutturale". Le alternative progettuali da analizzare dovranno comprendere anche l'ipotesi nulla (non esecuzione dell'intervento).

Quando si predilige un intervento di natura strutturale [8] è necessario mirare, per quanto possibile, a conferire alla rete stradale esistente gli standard geometrici e funzionali previsti dall'allegato tecnico al D.M. 5.11.2001 e da quelli successivamente emanati ai sensi dell'art. 13, comma 1, del D.L.vo 285/92. Il valore massimo della velocità di progetto V_{pmax} dell'intervento è definito a livello di rete, nella fase di pianificazione; tale valore dovrà essere scelto all'interno di un campo, opportunamente definito, per ciascun tipo di strada, considerando e confrontando con riferimento agli obiettivi prestazionali assunti, i vantaggi operativi, funzionali e di sicurezza offerti dai valori più elevati, con gli svantaggi prodotti da un progetto meno sensibile al contesto attraversato. In fase di esercizio dovranno essere adottate azioni di monitoraggio per verificare se il valore della V_{pmax} non risulti inferiore al valore medio ponderale della velocità operativa V_{85} del tronco di strada adeguato, assumendo come peso lo sviluppo degli elementi planimetrici componenti il tracciato.

La calibrazione, pertanto, di adeguati modelli di previsione della velocità operativa su strade esistenti, consente di evitare l'azione di monitoraggio, come richiesto dalla Bozza [8], per la definizione della V_{85} in sito, ed utilizzare equazioni *ad hoc* opportunamente validate a priori.

Uno degli obiettivi della ricerca in esame è, pertanto, la definizione di relazioni tra le caratteristiche geometriche e funzionali della strada e le velocità attinte dai conducenti, sulla base di osservazioni empiriche.

L'analisi sperimentale condotta, che s'illustrerà in dettaglio nel corso del manoscritto, riguarda elaborazioni sviluppate nel corso di un triennio, relativa al monitoraggio di otto strade extraurbane a singola carreggiata localizzate in piano, prive di raccordi clotoidici orizzontali di transizione tra rettilo e curva circolare, ricadenti nella Rete Viaria Ordinaria della Provincia di Salerno.

La sezione Strade del Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II" ha avviato dal 2003, in collaborazione con la Provincia di Salerno, un'articolata campagna di monitoraggio di una parte delle Strade Statali e Provinciali della viabilità Salernitana. Il piano di sezionamento, elaborato in maniera funzionale agli scopi cui la Ricerca si rivolge, ha visto l'utilizzo di apparecchiature a lettura ottica, in grado di registrare, per ciascun passaggio veicolare e per entrambi i sensi di percorrenza, lunghezza del veicolo, velocità istantanea e direzione di marcia. Le infrastrutture selezionate sono state monitorate in condizioni di luce diurna, assenza di pioggia e pavimentazione asciutta, e tutte caratterizzate da portata scarsa nelle ore di rilievo (volume di traffico inferiore o uguale a 400veic/h/corsia).

Gli Obiettivi della Ricerca sono raggruppati in due fasi e riassunti in Figura 1.



Figura 1_Sintesi degli Obiettivi del Programma di Ricerca

La prima fase della Ricerca ha riguardato l'analisi di sei fra le otto infrastrutture monitorate ed è stata focalizzata sull'analisi del comportamento di guida dell'utente sulle transizioni associate a ciascun elemento curvilineo circolare. I risultati ottenuti hanno mostrato un set di valori medi del tasso di accelerazione e decelerazione, funzione delle caratteristiche geometriche al contorno, dissimili dalla costante suggerita dal D.M. 5/11/2001, ed una ripartizione percentuale del tronco di transizione tra rettilineo e curva.

La seconda fase è stata rivolta alla calibrazione, taratura e validazione di modelli di previsione delle velocità operative su rettilineo e curva circolare, con l'esclusione di tutte le misure di velocità appartenenti alle zone di transizione individuate nel corso della prima fase. Il parametro stimato è stato, pertanto, l'85° percentile della distribuzione delle velocità. I modelli sono stati sviluppati con processo iterativo applicando l'ordinario metodo dei minimi quadrati con regressione multipla non lineare, confermando la dipendenza delle velocità dalle caratteristiche geometriche e non geometriche dei tracciati stradali.

Sono stati sviluppati, in particolare, quattro differenti modelli di previsione che restituiscono, per senso di marcia, una stima della V_{85} in ogni generica sezione stradale: due per i rettilinei, rispettivamente con sviluppo inferiore e maggiore a 500 metri, e due per gli elementi curvilinei circolari, rispettivamente per curve appartenenti a tronchi geometrici stradali con un tasso di variazione medio di curvatura maggiore e minore di 240 gon/km.

Per caratterizzare la qualità del risultato, restituito dal modello di previsione, è stato necessario associare al misurando V_{85} (grandezza d'uscita) un grado di incertezza indiretta dettato dalla propagazione dell'indeterminatezza, di cui sono affette le variabili d'ingresso (variabili indipendenti), sulla grandezza d'uscita. L'incertezza tipo composta, associata alla V_{85} è stata stimata con una procedura di agevole comprensione ed applicazione ripresa dalla UNI CEI ENV 13005 [32].

I modelli sono stati convenientemente validati su due strade escluse dal campione di calibrazione dei modelli ed analisi delle transizioni ma con caratteristiche geometriche, funzionali e di traffico assimilabili alle prime.

La procedura ha interessato la stima di tre indicatori statistici sintetici che hanno confermato la potenzialità delle equazioni di regressione di riprodurre, con ridotto errore, le reali velocità attinte dagli utenti.

1.4 Organizzazione della Ricerca

Il manoscritto è stato organizzato e sviluppato in sette capitoli come sinteticamente mostrato in Figura 2.



Figura 2_Organizzazione del Manoscritto

Il Capitolo 1 esamina il background del programma di ricerca, gli obiettivi e gli scopi prefissati, sintetizzando brevemente i risultati cui si è pervenuti.

Il Capitolo 2 illustra i numerosi lavori sperimentali e teorici presenti nella letteratura scientifica internazionale e nazionale che hanno riguardato l'analisi del comportamento di guida degli utenti su strade extraurbane a singola carreggiata, ponendo l'attenzione sull'evoluzione ed uso delle metodologie e procedure proposte dagli anni trascorsi ad oggi.

Il Capitolo 3 definisce le caratteristiche geometriche, funzionali e di traffico delle Infrastrutture stradali esaminate, la strumentazione impiegata per il rilievo delle velocità, la pianificazione e l'esecuzione delle campagne di sezionamento per il monitoraggio delle condizioni di traffico.

Il Capitolo 4 tratta dell'acquisizione ed interpretazione dei dati rilevati, approfondendo l'analisi del comportamento di guida degli utenti lungo le zone di transizione, intese come quelle aree dove i conducenti delle autovetture avviano e concludono in sicurezza la variazione di velocità nel passaggio rettilo – curva - rettilo. I risultati restituiti dalla prima elaborazione dei dati illustrano valori medi delle lunghezze di transizione per ciascuna curva circolare, la ripartizione percentuale di

queste tra curva e rettilineo, tassi di accelerazione e decelerazione variabili per sito e la verifica statistica delle misure ottenute.

Il Capitolo 5 tratta della procedura di calibrazione, taratura e validazione dei modelli di previsione delle velocità operative su rettilineo e curva, focalizzando l'attenzione sulla più conveniente formulazione matematica dell'85° percentile della distribuzione delle velocità in condizione di flusso libero, strada asciutta, luce diurna, buone condizioni meteorologiche. L'elaborazione dei dati ha visto la costruzione di quattro modelli predittivi, con un coefficiente di determinazione superiore in ogni caso al 70% ed un livello di significatività dei coefficienti minore del 5%. Il valore medio restituito da ciascuno dei quattro modelli è associato ad un grado di incertezza, dettato dalla propagazione dell'indeterminatezza a partire dalle variabili d'ingresso.

Il Capitolo 6 illustra una procedura per la calibrazione e taratura di un modello di previsione della Congruenza dei Tracciati stradali esistenti. E' possibile apprezzare l'omogeneità dell'intero tracciato con la definizione di un unico parametro che riflette l'intero profilo delle velocità operative e lo scostamento di ogni punto dal valore medio ponderale predetto. I risultati conseguiti sono stati, poi, confrontati con quelli derivati dall'applicazione dei criteri di Lamm [31].

Il Capitolo 7 fornisce dei criteri di applicazione dei risultati ottenuti combinando i risultati dell'analisi sulle transizioni con i valori di velocità operativa predetti con uno dei quattro modelli calibrati. Si propone anche un esempio di costruzione del profilo delle velocità operative che riproduce nel complesso il reale andamento delle velocità attinte dagli utenti in ciascuna sezione geometrica del tracciato stradale. Il Capitolo raccoglie, in fine, le conclusioni e le possibili linee di sviluppo futuro della Ricerca.

CAPITOLO 2. ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE

2.1 Introduzione

Il notevole peso delle caratteristiche geometriche e funzionali di una rete viaria sul comportamento di guida degli utenti è stato diffusamente analizzato attraverso studi teorico - sperimentali dei fattori che condizionano maggiormente le velocità di percorrenza di un tracciato.

Nel corso degli ultimi cinquanta anni numerosi studi e ricerche, frutto di osservazioni empiriche in varie parti del mondo, sono stati pubblicati sull'argomento, rilevando la notevole influenza sul comportamento di guida dell'utente delle caratteristiche piano - altimetriche dei tracciati stradali, delle specificità del veicolo in marcia, delle ragioni dello spostamento, delle caratteristiche ambientali e di traffico, dei limiti di velocità nonché delle peculiarità della zona esaminata.

Innumerevoli sono, dunque, le analisi rivolte alla calibrazione di modelli di previsione della velocità operativa; l'interesse di molti ricercatori si rivolge prevalentemente alle strade a carreggiata unica (*two-lane rural roads*) che rappresentano nella rete stradale nazionale lo scenario di molti incidenti mortali [31].

L'AASHTO Design Guide [3] relaziona la velocità di progetto alla curvatura orizzontale e verticale, alla pendenza trasversale, e alla distanza di visibilità del tronco geometrico esaminato; altre caratteristiche geometriche, come la larghezza delle corsie e delle banchine, non sono, invece, direttamente associate.

L'AASHTO raccomanda che la velocità di progetto deve essere influenzata anche dalla topografia dell'area, dall'uso del territorio circostante, dalle qualità funzionali dell'infrastruttura, dalle attitudini e capacità di guida dei conducenti, dalle caratteristiche prestazionali dei veicoli marcianti, dal numero totale di accessi privati sulla strada, delle condizioni meteorologiche e di stato della pavimentazione, dalla presenza di altri veicoli e dai limiti di velocità [5].

Fitzpatrick et al. [10] rilevarono, alla fine degli anni novanta, che i principali fattori, definiti dalle agenzie di trasporto statunitensi influenti sulle velocità di progetto, erano peculiarità dell'ambiente attraversato, classe funzionale di appartenenza della strada, volume di traffico, costi di costruzione dell'intervento, congruenza del corridoio stradale. Lo studio evidenziò che più del 75% delle Amministrazioni pretendevano di essere ragguagliate sul valore atteso della velocità operativa, simultaneamente alla velocità di progetto definita.

Diversi Paesi hanno ormai incorporato negli standards di progettazione, come dettagliatamente illustrato nel corso del primo paragrafo, l'utilizzo della velocità operativa come strumento di supporto per il dimensionamento di specifici elementi non restrittivi del tracciato e di caratteristiche geometriche come la pendenza trasversale in curva, la distanza di visibilità per l'arresto, e le verifiche di congruenza dei tracciati. Il provvedimento, cui ricorrono spesso diverse Agenzie di Trasporto Internazionali [5] quando in fase di esercizio si rileva una velocità maggiore di quella di progetto, è l'installazione di segnaletica verticale di pericolo. Tale circostanza ha suggerito [3] [27] di fissare i limiti di velocità, come esposto anche nel Traffic Control Devices Handbook del 2001, al di sotto o coincidente con l'85° percentile della distribuzione delle velocità in condizioni di flusso libero, e, comunque, supportati da indagini sul fenomeno dell'incidentalità e sulle condizioni ambientali - morfologiche dell'area interessata.

Diversi percentili della distribuzione delle velocità sono stati negli anni suggeriti [28] [34], come l'intera distribuzione [30] [13], nonostante l'85° percentile fosse ritenuto uno stimatore corretto del comportamento di guida dell'utente su strada extraurbana, in condizioni di veicolo isolato, pavimentazione asciutta, luce diurna e buone condizioni meteorologiche.

2.2 Caratteristiche geometriche stradali come fattori di velocità

Nonostante una grande parte del mondo scientifico abbia rivolto l'interesse, da anni, allo studio della velocità, c'è ancora molto da scoprire sui fattori che la influenzano.

I parametri coinvolti sono molteplici e di natura anche sensibilmente diversa, come mostrano i numerosi lavori sperimentali in letteratura. I fattori, che influenzano le velocità operative, possono essere raggruppati in caratteristiche geometriche stradali, competenze del conducente, prestazioni del veicolo, motivi dello spostamento, condizioni di traffico ed ambientali, limite di velocità e livello di sicurezza intrinseca dell'infrastruttura. Presumendo che si possano stimare tutti questi fattori, la scelta della singola velocità deriverà, comunque, da una decisione "ottimale" che l'utente compirà istantaneamente nel preferire un incremento del livello di sicurezza e/o una riduzione del tempo di percorrenza stimato.

Ricercatori di tutto il mondo, pertanto, si sono occupati di formulare modelli di previsione ottimale del comportamento di guida dell'utente.

McLean [12], attraverso un'analisi sperimentale condotta su strade extraurbane in Australia, appurò che sui tronchi geometrici in rettilineo sussisteva una forte dipendenza della velocità operativa dalla tipologia funzionale della strada, dallo sviluppo del rettilineo e dal motivo dello spostamento, mentre sugli elementi curvilinei circolari esisteva un forte legame della velocità operativa con la curvatura, con la velocità operativa del rettilineo che precedeva e la distanza di visibilità disponibile.

Polus. et al. [35] evidenziarono che la velocità operativa, su tronchi geometrici di strada extraurbana ad unica carreggiata in rettilineo, era fortemente influenzata dallo sviluppo dei rettilinei e dal raggio della curva che precedeva e seguiva. Elementi che presentarono, invece, una cattiva correlazione con la velocità e, quindi, meno influenti sulle variazioni di velocità, furono la presenza di spirali di transizione, dei limiti di velocità, dei guardrails, delle dimensioni della sezione trasversale, della pendenza longitudinale delle livellette, della morfologia del terreno e delle performance dei conducenti.

Schurr. et al. [34] analizzarono il valore medio della velocità e l'85° percentile della distribuzione delle velocità in rettilineo, ed anche il 95° percentile nelle sezioni di centro – curva. I ricercatori verificarono, nel primo caso, una buona correlazione delle tre variabili cinematiche con i limiti di velocità ed un legame debole con le dimensioni della sezione trasversale; nel secondo caso, invece, rilevarono una relazione inversa con l'angolo di deviazione ed una diretta con lo sviluppo dell'elemento curvilineo.

Kanellaidis [36] a seguito di ricerche condotte su strade extraurbane in Grecia ritrovò l'esistenza di un forte legame della velocità operativa in curva con la curvatura della stessa, la velocità operativa del rettilineo che precedeva e la distanza di visibilità disponibile.

Islam e Seneviratne [37] elaborarono, invece, quattro differenti modelli di previsione della velocità operativa, funzione del grado di curvatura, che stimavano il valore dell'85° percentile della distribuzione delle velocità per le sezioni d'inizio, fine e centro - curva.

Ognuno di questi modelli, pertanto, pur fornendo importanti risultati di carattere generale ed individuando una serie di variabili indipendenti adatte a correlare la geometria degli elementi alle velocità, non può essere considerato universalmente valido; il motivo è da ricercarsi nelle differenze, a volte sostanziali, tra una realtà nazionale e l'altra (e, a volte, anche tra diverse realtà locali all'interno dello stesso Paese) in termini di orografia del territorio attraversato, condizioni climatiche, parco veicolare, abitudini degli utenti [38]. Lo sforzo di tutti gli esperti, all'atto della calibrazione e

taratura di un modello di previsione, è, in ogni caso, rivolto al superamento dei problemi che impediscono la definizione di un modello predittivo completo e attendibile.

2.3 Analisi del Comportamento di guida degli utenti su rettilifo, curva e transizione rettilifo – curva – rettilifo

2.3.1 Introduzione

Nella letteratura scientifica si ritrova un nutrito numero di memorie orientato all'osservazione del comportamento dei guidatori lungo le transizioni rettilifo – curva – rettilifo, in particolar modo su strade a due corsie prive di raccordi clotoidici planimetrici tra elementi a curvatura nulla e costante.

Le sperimentazioni sono finalizzate, principalmente, alla formazione di modelli di previsione della velocità operativa non solo sui tronchi ove la velocità di marcia è pressoché costante, ma anche su tutte le aree ove il moto si presenta decelerato e/o accelerato.

L'intento è di calibrare, tarare e validare modelli predittivi delle velocità su rettilifo e curva, da adoperare congiuntamente ai risultati delle analisi condotte lungo le transizioni, per la costruzione di un profilo continuo e completo delle velocità.

2.3.2 Modelli di previsione delle velocità operative in Rettilifo

I modelli di previsione delle velocità in rettilifo sono ottenuti, nella maggior parte dei casi, seguendo due correnti fondamentali.

In un primo caso, i modelli sono derivati dalle relazioni ottenute per le curve circolari, estendendo all'infinito il dominio della variabile indipendente R (raggio di curvatura), limitando, in ogni caso, l'accuratezza a causa dell'impiego di relazioni formulate specificamente per gli elementi curvilinei circolari ed ottimizzati per essi.

Un secondo indirizzo traccia, invece, specifiche relazioni tra la velocità operativa in rettilifo e le generali peculiarità del tronco esaminato, non solo di natura geometrica bensì ambientale, di traffico, morfologica, ed infrastrutturale.

Ad oggi, nella bibliografia internazionale, il numero dei lavori sull'argomento sono piuttosto esigui se confrontati con la produzione riguardante i modelli di previsione della V_{85} su curve circolari; ciò scaturisce, presumibilmente, dal maggior

numero di fattori che possono influenzare le velocità dei conducenti in rettilineo e dalla loro elevata variabilità da utente ad utente.

Per conseguire, quindi, risultati affidabili, è necessario disporre di un data - base per i rettilineo ben più ampio e complesso di quello che si intende adottare per le curve circolari.

La Tabella 1 mostra una parte dei principali modelli di previsione delle velocità operative in rettilineo, reperibili in letteratura, per strade extraurbane ad unica carreggiata localizzate per lo più in piano, ove le condizioni di rilievo registrate sono quelle di flusso libero.

Tabella 1_Tipologie di Modelli di Previsione della Velocità in rettilineo

AUTORE	STATO	MODELLO	ρ^2
Cardoso (1995)	Portogallo	$V_{85T} = 41,67 - 548,892 / R_{Cp} + 0,0238 \cdot R_{Cp} + 0,0165 \cdot L_T - 0,0207 \cdot R_{Cs} + 5,95 \cdot L_c + 5,28 \cdot L_b$	0,90
Andueza (2000)	Venezuela	$V_{85T} = 100,69 - 3032 / R_{Cp} + 0,027819 \cdot L_T$	0,79
Polus et al. (2000)	USA	$V_{85T} = 101,1 - 3420 / R_{m(1,2)}$	0,55
Schurr et al. (2002)	USA	$V_{85T} = 70,2 + 0,43 V_P - 0,001 TGM$	0,19
		$V_{MT} = 51,7 + 51 V_P$	0,30
Fitzpatrick et al. (2003)	USA	$V_{85T} = 36,4 + 0,52 V_P$	0,81
		$V_{85T} = 16,1 + 0,83 V_P - 0,05 DA$ per ogni classe funzionale	0,92
Crisman et al.-MOST (2004)	Italia	$V_{85T} = -2,351 + 18,104 \log_{10}(L_T) + 0,585 V_{85CP}$	0,88
Bella (2005)	Italia	$V_{85T} = -0,073 \cdot CCR_{S(i-1)} + 0,027 \cdot L_T - 1,61 \cdot i + 126,4$	0,88
Crisman et al.-MOST (2005)	Italia	$V_{85T} = V_{85Cp} + 0,081 \cdot L_T 0,75$	0,67
Perco (2008)	Italia	$V_{85T} = 123,54 - 2,79 CCR^{0,47}$ con $L > 500m$	0,77

Le variabili indipendenti esplicative, collocate al secondo membro delle espressioni analitiche mostrate in Tabella 1, definiscono una serie di caratteristiche geometriche e cinematiche, definite dettagliatamente in Tabella 2. In particolare il tasso di variazione di curvatura del singolo elemento curvilineo, indicato in Tabella 2 con l'acronimo CCR_s , è misurato con la (1) in gon/km e riproduce il rapporto tra la deviazione angolare totale, misurata tra le tangenti alla curva nel punto iniziale e finale dell'elemento (in gon, cioè gradi centesimali) e la lunghezza complessiva del tratto curvilineo.

$$CCR_s = \frac{200}{\pi} \cdot \frac{\left(\frac{L_2}{R} + \frac{L_1 + L_3}{2R} \right)}{L} \quad (1)$$

Tabella 2_ Definizioni delle Variabili Indipendenti riportate in Tabella 1

VARIABILE INDIPEDENTE	CARATTERISTICA DEFINITA
$CCR_{S(i-1)}$	<i>tasso di variazione della curvatura della singola curva che precede il rettifilo, in gon/km</i>
CCR	<i>tasso di variazione della curvatura del tronco omogeneo al quale il rettifilo appartiene, in gon/km</i>
DA	<i>densità di accessi per miglia</i>
i	<i>pendenza longitudinale, in percentuale</i>
L_b	<i>larghezza della banchina, in metri</i>
L_c	<i>larghezza della corsia, in metri</i>
L_T	<i>lunghezza del rettifilo, in metri</i>
R_{Cp}	<i>raggio della curva che precede, in metri</i>
R_{Cs}	<i>raggio della curva che segue, in metri</i>
$R_{m(1,2)}$	<i>Valore medio del raggio tra la curva che precede e segue, in metri</i>
TGM	<i>traffico giornaliero medio, in veic/giorno</i>
V_p	<i>limite di velocità imposto, in km/h</i>
V_{85Cp}	<i>85° percentile della distribuzione delle velocità, per veicolo isolato, della curva precedente, in km/h</i>
V_{85T}	<i>85° percentile della distribuzione delle velocità, per veicolo isolato, in rettifilo, in km/h</i>

Il tasso di variazione di curvatura di un tronco omogeneo, indicato in Tabella 2 con l'acronimo CCR e misurato in gon/km, è misurato, come rapporto tra la deviazione angolare cumulata e la lunghezza del tratto.

La deviazione angolare di un tronco geometrico stradale è stimata attraverso la valutazione del grado di curvatura, indicato simbolicamente come *DC* (*degree of curvature*), secondo l'espressione (2) :

$$DC = \frac{360}{2\pi} \cdot \frac{100}{R} \quad (2)$$

Il grado di curvatura, in particolare, descrive l'angolo al centro che sottende un arco con sviluppo pari a 100 m appartenente ad una circonferenza di raggio pari ad R. Con riferimento al solo tratto di curva circolare (trascurando la presenza delle clotoidi), è possibile passare dal parametro DC a CCR_s con un fattore di conversione stimato attraverso l'espressione (3):

$$CCR_s = \frac{200}{180 \cdot 10^{-1}} \cdot CD = 11,11 \cdot CD \quad (3)$$

I modelli in Tabella 1 presentano non solo dimensioni differenti della base campionaria ma anche differenti tipologie di campagne di monitoraggio effettuate.

Cardoso [39] ha sviluppato, per esempio, un'accurata campagna di monitoraggio nel sud del Portogallo su trentasette rettifili appartenenti a strade extraurbane; il tronco geometrico stradale analizzato ha un'estensione di circa 4000 km. Il modello calibrato di previsione della V_{85} restituisce il valore di velocità operativa per differenti sezioni geometriche del tracciato orizzontale, ed è funzione dello sviluppo del rettifilo, dell'ampiezza del raggio della curva precedente e seguente, e della larghezza della corsia e della banchina.

Andueza [40] ha condotto, invece, analisi sperimentali su strade di montagna. Sebbene lo scenario totalmente differente da quello comunemente analizzato, per gli scopi cui la ricerca si rivolge, il modello si è, in ogni caso, illustrato in Tabella 1 per evidenziare la natura delle variabili indipendenti, quali il raggio della curva che precede e la lunghezza del rettifilo stesso, impiegate, anche, nella previsione della V_{85} su strade extraurbane.

Polus et al. [35], rielaborando le misure sperimentali di velocità rilevate da Fitzpatrick et al [10] in condizioni di flusso libero, hanno suddiviso la base campionaria in quattro differenti gruppi in funzione dello sviluppo del rettifilo e del raggio orizzontale della curva che precede e segue. L'analisi di regressione condotta, secondo il metodo dei minimi quadrati, ha restituito la forma riportata in Tabella 1 valida per rettifili con lunghezza minore di 500 piedi e curve di raggio superiore a 820 piedi.

Schurr et al. [34] hanno realizzato un'accurata campagna sperimentale di monitoraggio di cinquanta siti su strade extraurbane, ove il limite di velocità rilevato oscillava tra i 90km/h e i 105km/h; per ogni sezione monitorata, in particolare, sono state ottenute almeno 112 osservazioni utili di velocità in condizioni di flusso libero.

Fitzpatrick et al. [13] rilevarono misure di velocità e caratteristiche geometriche su un campione di 78 siti appartenenti a sette differenti Stati. Ciascuna sezione monitorata distava dai limitrofi elementi curvilinei circolari almeno 0,16 km e da

eventuale segnaletica verticale almeno 0,32 km. Il limite di velocità rilevato sui tronchi geometrici esaminati oscillava tra i 40 km/h ed i 90 km/h. Sono state acquisite, per ogni sezione, un minimo di 100 misure utili di velocità in condizioni flusso libero. I modelli calibrati di previsione della velocità operativa sono quattro e ciascuno di essi è associato ad una particolare tipologia funzionale dell'infrastruttura. In particolare, il modello che è possibile adottare per qualsiasi tipologia di strada prevede come variabili indipendenti il limite di velocità imposto, la densità di accessi e la presenza d'intersezioni per miglia, mentre per le strade extraurbane compare il solo limite di velocità.

A differenza dei modelli predittivi fin ora presentati, Bella [41] ha introdotto come variabile indipendente anche la pendenza longitudinale che rispecchia il profilo altimetrico dell'asse stradale. Mediante l'uso di un simulatore di guida, che ha permesso di definire le caratteristiche planimetriche, altimetriche e tipologiche della strada in esame, il ricercatore ha collezionato misure di velocità concernenti strade extraurbane a due corsie di marcia ad unica carreggiata, con larghezza delle corsie pari a 3,75 m, banchine pari a 1,50 m e pendenza longitudinale variabile tra - 6% e + 6%. Il modello calibrato dipende dal tasso di variazione di curvatura della curva precedente, dallo sviluppo dell'elemento rettilineo e dalla sua pendenza longitudinale.

L'analisi delle equazioni presentate in Tabella 1 si conclude con il modello di previsione della V_{85} sviluppato dai ricercatori del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Trieste, ideato nell'ambito di un Progetto nazionale denominato IASPIS. Il modello rientra in una procedura globale, denominata MOST (Model of Operating Speed Trieste), che propone di illustrare il comportamento di guida dell'utente sul tracciato stradale. La versione proposta nel 2004 [42] includeva, come variabili indipendenti, lo sviluppo del rettilineo e la velocità operativa della curva precedente, calibrata con l'introduzione anche di elementi circolari con raggio superiore a 2187m. Le successive modifiche [43], apportate al modello nel 2005 a seguito di una variazione nella dimensione della base campionaria, restituiscono la medesima forma funzionale senza alterare la tipologia delle variabili indipendenti coinvolte. Uno dei lavori più recenti [45] prevede, infine, una sinergia tra il modello di previsione della V_{85} in rettilineo, in curva e sulle zone di transizione; con particolare riferimento al modello di previsione in rettilineo, si escludono quelli dipendenti, con sviluppo, cioè, inferiore a 500m, adottando solo quelli con sviluppo superiore a 500m perché concedono di stimare una *velocità desiderata*.

2.3.3 Analisi del Comportamento di guida degli utenti su Elementi Curvilinei Circolari

2.3.3.1 Introduzione

L'analisi del comportamento di guida degli utenti su elementi curvilinei circolari ed, in particolare, in approccio ed uscita da essi, ha conquistato, da tempo, un'ampia parte dei programmi di ricerca rivolti al perfezionamento dei principi di progettazione geometrica e funzionale delle strade. Un utente che transita, per esempio, dal rettilo alla curva circolare è sottoposto ad una decelerazione centripeta e, quindi, ad una forza centrifuga, che potrebbe compromettere le condizioni di sicurezza e regolarità di marcia. Per evitare una brusca variazione di velocità, gli automobilisti sfruttano meccanicamente la larghezza della corsia, eseguendo una breve traiettoria a raggio variabile, o, come si suol dire, *tagliano la curva*.

La normativa italiana [7] prevede, in tal senso, l'adozione di una spirale di transizione a curvatura variabile che limita sia la variazione di pendenza trasversale sia il contraccolpo nel transito rettilo - curva - rettilo. Il Decreto Ministeriale 5/11/2001 [7] impone che sull'intero sviluppo dell'elemento curvilineo circolare la velocità di progetto deve essere costante, mentre tutte le possibili variazioni devono esaurirsi sulle clotoidi e su parte dei rettili limitrofi, quando la distanza di transizione richiesta supera lo sviluppo dell'elemento a spirale.

La tendenza attuale dei progettisti è di realizzare, per le nuove Infrastrutture, delle clotoidi con sviluppo limitato, poiché curve di transito con lunghezza eccessiva possano risultare inutili se non addirittura dannose per l'incremento di pericolosità che la strada può subire. Peraltro, in alcuni Standards di progettazione internazionale i raccordi di transito sono esplicitamente vietati, ritenendo che le variazioni di velocità debbano svilupparsi, per la sicurezza dell'utente, sui tratti terminali degli elementi curvatura nulla.

Numerosi gruppi di ricerca hanno evidenziato, con adeguate campagne sperimentali, l'esistenza di una correlazione tra tasso d'incidentalità e massima riduzione di velocità attinta dagli utenti nelle variazioni di curvatura dell'asse stradale. In particolare, è emerso che le manovre in curva, particolarmente su quelle di piccolo raggio [44], appaiono più rischiose di quelle in rettilo giacché l'utente avverte una maggiore difficoltà nel costeggiare la linea d'asse.

Nell'indicare, pertanto, i tratti di passaggio tra due elementi a curvatura differente, si è solito riferirsi alla terminologia *zona di transizione*.

Il tema del comportamento di guida degli utenti in approccio, in uscita e sul tronco curvilineo circolare, ha ritrovato nel corso degli anni diverse interpretazioni.

Alcune scuole di pensiero hanno focalizzato, infatti, l'attenzione sulla valutazione di stimatori sintetici delle variazioni di velocità in approccio ed allontanamento - curva, altre si sono orientate all'analisi dei tassi di decelerazione ed accelerazione per la verifica delle ipotesi semplificatrici da norma mentre altre alla calibrazione di modelli di previsione della velocità lungo le curve circolari e relative transizioni.

2.3.3.2 Valutazione Stimatori Sintetici

Mc Fadden J. e Elefteriadou L. [48] hanno sviluppato una campagna di monitoraggio delle condizioni di traffico su un campione di 21 siti, di cui 9 ricadenti nel Texas e 12 in Pensilvania. Le misure di velocità sono state ottenute, con l'utilizzo di un Lidar gun, in condizione di veicolo isolato con un minimo di 75 misure utile per sito.

Ciascuna sezione esaminata appartiene ad un'area compresa tra i primi 200 metri, antecedenti la sezione di inizio - curva, ed i successivi 200 metri, consecutivi la sezione di fine - curva, come illustrato in Figura 3.

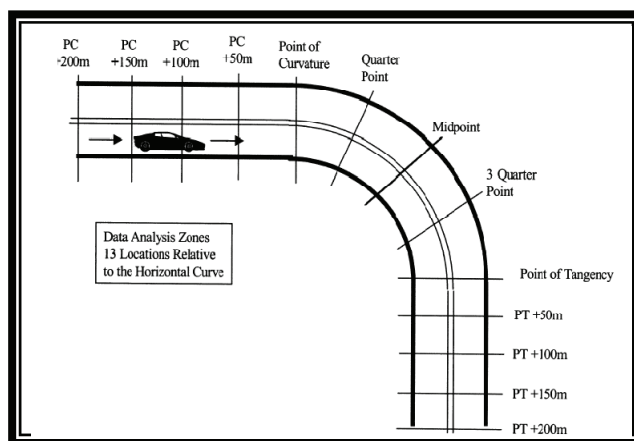


Figura 3_ Piano di sezionamento dell'Università dell'Alabama e della Pensilvania

I ricercatori hanno confermato, con l'analisi sperimentale condotta, i risultati conseguiti da Hirsh [49], nell'ambito di una metodologia messa a punto per la verifica della “*design consistency*” di un tracciato stradale, secondo la quale una semplice differenza di velocità operativa tra due consecutivi elementi geometrici sottostima la reale variazione di velocità attinta dagli utenti nel transito rettilineo -curva - rettilineo. In tal senso, sono stati definiti, per ciascun sito, i tre seguenti parametri:

- 85S2: differenza di velocità operativa (V_{85}) tra la sezione di centro - rettilineo e la sezione di centro - curva
- 85S9: differenza di velocità operativa (V_{85}) tra il massimo valore registrato sul rettilineo di approccio - curva ed il più piccolo valore in curva
- 85MSR: 85° percentile della distribuzione delle massime riduzioni di velocità attinte dagli utenti in corrispondenza di ciascun sito (rettilineo - curva - rettilineo)

Gli studiosi hanno, poi, calibrato due modelli di previsione dell'85° percentile della distribuzione delle riduzioni di velocità ($V_{85\text{reduc}}$) lungo le transizioni, pervenendo alle espressioni (4) e (5):

$$V_{85\text{reduc}} = -14,90 + (0,144 V_{85@PC_{200}}) + (0,0153 \text{ LAPT}) + (954,55 / R) \quad (4)$$

$$V_{85\text{reduc}} = -0,812 + (0,017 \text{ LAPT}) + (998,19 / R) \quad (5)$$

dove

$V_{85\text{reduc}} = 85^\circ$ percentile della distribuzione delle massime riduzioni di velocità in transizione, in km/h

$V_{85@PC_{200}} = 85^\circ$ percentile della distribuzione delle velocità in corrispondenza della sezione distante 200m da quella di inizio - curva, in km/h

$R =$ Raggio della curva circolare, in metri

$\text{LAPT} =$ Lunghezza del rettilineo di approccio - curva, in metri

L'espressione (4) differisce dalla (5) per l'inserimento di una grandezza che stima l'85° percentile della distribuzione delle velocità in corrispondenza della sezione PC_{200} ; tutte le variabili indipendenti introdotte hanno, comunque, un intervallo di confidenza pari almeno al 95%.

Analogamente Nie ed Hassan [50], reclutando trenta utenti di età compresa tra venti e cinquanta con esperienza di guida maggiore di cinque e poco meno inferiore a diciassette anni, hanno rilevato, attraverso una campagna sperimentale, le velocità con un veicolo test equipaggiato di strumenti elettronici. Il tracciato stradale analizzato consta di circa 100 km e raggruppa strade di tipo urbano ed extraurbano. Gli autori hanno focalizzato l'attenzione sul tronco geometrico stradale compreso tra i primi 200 metri, precedenti la curva, ed i successivi 200 metri, consecutivi la sezione di fine - curva, conformemente a quanto indicato dai precedenti ricercatori [48].

I parametri sintetici stimati per l'analisi di Congruenza dei tracciati sono i seguenti:

- ΔV_{85} : differenza di V_{85} tra la sezione di approccio - curva e quella di centro - curva
- $\Delta_{85}V$: 85° percentile della massima riduzione di velocità, registrata per ciascun utente e sito, tra la sezione di approccio - curva e quella di centro - curva
- 85MSR: 85° percentile della distribuzione delle massime riduzioni di velocità, attinte da ciascun utente per sito, stimate come differenza tra il massimo valore di velocità sul rettilineo di approccio - curva ed il minimo valore attinto in curva
- 85MSI: 85° percentile della distribuzione dei massimi incrementi di velocità, attinti da ciascun utente per sito, misurati come differenza tra il massimo valore di velocità sul rettilineo di allontanamento - curva ed il minimo valore attinto in curva

I ricercatori hanno, poi, calibrato modelli di previsione delle variabili 85MSR, 85MSI, ΔV_{85} e $\Delta_{85}V$ sia per strade extraurbane che urbane. Le espressioni analitiche (6) (7) (8) (9) (10) riguardano le sole strade extraurbane; in particolare, gli ultimi tre modelli sono applicabili alle sole curve con rettifili di approccio indipendenti:

$$85MSR = 17,857 - 0,080 L_{DT} + 7,324 DFC \quad r^2 = 0,73 \quad (6)$$

$$85MSI = -0,410 + 0,078 L_{DT} \quad r^2 = 0,72 \quad (7)$$

$$\Delta V_{85} = -5,326 + 0,073 CCR \quad r^2 = 0,57 \quad (8)$$

$$\Delta_{85}V = -4,540 + 0,088 CCR \quad r^2 = 0,75 \quad (9)$$

$$85MSR = -0,658 + 0,107 CCR \quad r^2 = 0,76 \quad (10)$$

dove

L_{DT} = *Lunghezza del rettilineo di approccio - curva*, in metri

DFC = *Angolo di deflessione*, in radianti

CCR = *Tasso di variazione di curvatura del tronco omogeneo*, in gon/km

2.3.3.3 Modelli di Previsione delle Velocità Operative su Curve Circolari

I modelli, proposti in letteratura, per la previsione della velocità operativa su elementi curvilinei circolari si avvalgono, essenzialmente, di due tipologie di variabili: quelle proprie dell'elemento considerato, di natura non strettamente geometrica, e quelle concernenti gli elementi limitrofi o del tracciato nel suo complesso.

La Tabella 3 presenta una parte dei numerosi modelli reperibili nella letteratura scientifica, sviluppati nel tempo da gruppi di ricercatori internazionali e nazionali, derivanti da rilievi sperimentali su strade extraurbane con pendenze longitudinali solitamente inferiori al 6%, in condizioni di flusso libero e per sole autovetture. Si nota come il numero delle espressioni adoperate per la previsione della velocità operativa in curva sia sicuramente più corposo rispetto a quello dei rettilifi.

Tabella 3 Tipologie Modelli di previsione della velocità in curva

AUTORE	PAESE	MODELLO	ρ^z
Taragin (1954)	USA	$V_{85} = 88,87 - 2554,76 / R$	0,86
McLean (1978)	Australia	$V_{85} = 101,2 - 1,56 \cdot DC = 101,2 - 0,043 \cdot CCR$	0,87
McLean (1981)	Australia	$V_{85} = 53,80 + 0,464 \cdot V_{env} - 3260 / R + 85000 / R^2$	0,92
Kerman et al. (1982)	Inghilterra	$V_{85} = V_a \cdot (1 - V_a^2 / (400 \cdot R))$	0,91
Guidelines for the design of roads (RAS-L-1) (1984)	Germania	$V_{85} = 60 + 39,70 \cdot \exp(-3,58 \cdot 10^{-3} \cdot CCR)$	0,79
Glennon et al. (1986)	USA	$V_{85} = 103,96 - (4524,94 / R)$	0,84
SETRA (1986)	Francia	$V_{85} = 102 / (1 + 346 \cdot (CCR / 63700)^{1,5})$ $V_{85} = 102 / [1 + (346 / R^{1,5})]$	-
Lamm e Choueiri (1987)	USA	$V_{85} = 95,77 - 0,076 \cdot CCR$	0,84
Kanellaidis et al. (1990)	Grecia	$V_{85} = 32,20 + 0,839 \cdot V_d + 2226,9 / R - 533,6 / \sqrt{R}$	0,92
Lamm (1993)	Germania	$V_{85} = 106 / (8270 + 8,01 \cdot CCR)$	0,73
Ottesen e Krammes (1994)	USA	$V_{85} = 103,04 - 0,0477 \cdot CCR$	0,80
Morrall e Talarico (1994)	Canada	$V_{85} = \exp(4,561 - 5,86 \cdot 10^{-3} \cdot DC)$	0,63
Islam e Seneviratne (1994)	USA	$V_{85,PC} = 95,4 - 1,48 DC - 0,01 DC^2$ $V_{85,MD} = 103,0 - 2,41 DC - 0,03 DC^2$ $V_{85,PT} = 96,1 - 1,07 DC$	0,99 0,98 0,90

Krammes et al. (1995)	USA	$V_{85} = 41,62 - 1,29 \cdot DC + 0,0049 \cdot L_c - 0,21 \cdot DF + 0,95 \cdot V_a$	0,90															
Lamm et al. (1995)	Grecia	$V_{85} = 10^6 / 10150,1 + 7,676 \cdot CCR$	0,81															
Choueiri et al. (1995)	Libano	$V_{85} = 91,03 - 0,050 \cdot CCR$	0,81															
Voigt (1996)	USA	$V_{85} = 99,61 - (2951,37 / R)$	0,84															
Capaldo e Grossi (1998)	Italia	$V_{85} = (118 - 1,8 \cdot G1) \cdot (1 - 0,543 \cdot CCR)$	-															
Passetti e Fambro (1999)	USA	$V_{85} = 103,90 - (3020,50 / R)$	0,68															
Fitzpatrick et al. (1999)	USA	$V_{85} = 105,3 - 3438,19 / R$ $V_{85} = 103,2 - 3576,51 / R$	0,92 0,74															
Fitzpatrick et al. (2000)	USA	$V_{85} = 106,30 - (3595,29 / R)$	0,92															
Ottesen e Krammes (2000)	USA	$V_{85} = 102,44 - 1,57 \cdot DC - 0,012 \cdot LC - 0,01 \cdot DC \cdot LC$	0,81															
Andueza (2000)	Venezuela	$V_{85} = 98,25 - 2795 / R - 894 / R_a + 7,486 \cdot DC + 9,308 \cdot L_T$	0,81															
Marchionna et al. (2001) Progetto IASPIS	Italia	$V_{85} = 93,96 - 0,633 \cdot DC + 0,0026 \cdot DC^2$	0,86															
Gibreel et al. (2001)	Canada	$V_{85} = 105,32 - 0,418 \cdot G_2 - 0,123 \cdot \sqrt{L_0}$	0,83															
Jessen et al. 2001)	USA	$V_{85} = 86,80 + 0,297 \cdot V_P - 0,614 \cdot G_1 - 0,00239 \cdot ADT$	0,54															
Donnell et al. (2001)	USA	$V_{85} = 74,5 + 0,0176 \cdot R - 1,69 \cdot G_2 - 0,00810 \cdot L_{T2}$	0,61															
Schurr et al. (2002)	USA	$V_{MEAN,C} = 67,4 - 0,11 \Delta + 0,022 L_c + 0,28 V_p$ $V_{85,C} = 103,3 - 0,12 \Delta + 0,024 L_c - 1,04 G_1$	0,55 0,46															
Bella et al. (2005)	Italia	$V_{85} = - 0,0297 \cdot CCRS - 1,13 \cdot G1 + 154$	0,83															
Bevilacqua et al. (2004)	Italia	$V_{85} = 125,13 - 0,034 \cdot CCRS - 1,253 \cdot G1$	0,79															
Crisman et al. (2004) -MOST-	Italia	$V_{85} = 48,447 - 4995,01 / R + 163893,24 / R^2 + 0,5598 \cdot V_{amb}$	0,88															
Crisman et al. (2005) -MOST-	Italia	$V_{85} = V_{amb} / (1 + 4,75 / R^{0,58})$ $V_{85} = 48,40 - 4995,00 / R + 163893,20 / R^2 + 0,60 \cdot V_{amb}$	0,88															
Marchionna e Perco (2007)	Italia	<table><tr><th>Range CCR [gon/km]</th><th>Range di V_{env} [km/h]</th><th>Modello di Previsione V_{85} [km/h]</th></tr><tr><td>< 30</td><td>> 110</td><td>$V_{85} = 124,08 - 563,78 / R^{1,2}$</td></tr><tr><td>30 - 80</td><td>110 - 100</td><td>$V_{85} = 118,11 - 510,56 / R^{1,2}$</td></tr><tr><td>80 - 160</td><td>100 - 90</td><td>$V_{85} = 111,65 - 437,44 / R^{1,2}$</td></tr><tr><td>> 160</td><td>< 90</td><td>$V_{85} = 100,85 - 346,62 / R^{1,2}$</td></tr></table>	Range CCR [gon/km]	Range di V_{env} [km/h]	Modello di Previsione V_{85} [km/h]	< 30	> 110	$V_{85} = 124,08 - 563,78 / R^{1,2}$	30 - 80	110 - 100	$V_{85} = 118,11 - 510,56 / R^{1,2}$	80 - 160	100 - 90	$V_{85} = 111,65 - 437,44 / R^{1,2}$	> 160	< 90	$V_{85} = 100,85 - 346,62 / R^{1,2}$	0,40
		Range CCR [gon/km]	Range di V_{env} [km/h]	Modello di Previsione V_{85} [km/h]														
		< 30	> 110	$V_{85} = 124,08 - 563,78 / R^{1,2}$														
		30 - 80	110 - 100	$V_{85} = 118,11 - 510,56 / R^{1,2}$														
		80 - 160	100 - 90	$V_{85} = 111,65 - 437,44 / R^{1,2}$														
> 160	< 90	$V_{85} = 100,85 - 346,62 / R^{1,2}$																
			0,58															
			0,80															
			0,89															

Nie e Hassan (2007)	Canada	VALIDO PER TUTTE LE CURVE	$V_{85_AT} = 81,782 + 0,086 L_{AT}$	0,66
			$V_{85_BC} = 108,132 - 0,090 CCR$	0,71
			$V_{85_MC} = 108,357 - 0,097 CCR$	0,86
			$V_{85_EC} = 102,238 - 0,092 CCR + 0,039 L_{DT}$	0,94
			$V_{85_DT} = 78,690 + 0,00001127 R^2 + 0,066 L_{DT}$	0,86
			$V_{85_MC} = 110,386 - 6856,213 (1/R)$	0,91
		CURVE CON RETTIFICHE DI APPROCCIO INDIPENDENTI	$V_{85_BC} = 30,563 + 10,582 \ln (R)$	0,78
			$V_{85_EC} = 111,404 - 7360,698 (1/R)$	0,87
			$V_{85_DT} = 76,486 + 0,127 L_{DT}$	0,77
SETRA (2008)	Francia	$V_{85} = 102 / [1 + (346 / R^{1,5})]$		

Il significato di ciascuna variabile indipendente, collocata al secondo membro delle equazioni esibite in Tabella 3, è illustrato in Tabella 4.

I modelli di previsione della velocità operativa in curva possono essere presentati in due macro - insiemi, a loro volta scomponibili in sotto - classi, come illustrato in Figura 3. Si evince in letteratura l'esistenza di una prima parte di modelli che correla la velocità operativa alle sole caratteristiche geometriche ed una seconda che introduce termini cinematici. Le caratteristiche geometriche, a loro volta, possono limitarsi alla definizione del semplice raggio, riflettere le peculiarità dell'intero tronco geometrico al quale la curva appartiene, e/o richiamare le proprietà degli elementi che precedono e seguono. I parametri cinematici, invece, possono riflettere le velocità operative degli elementi geometrici che precedono e/o seguono la curva circolare, e/o richiamare la velocità desiderata sui tronchi omogenei componenti il tracciato stradale.

Alcuni dei modelli, presentati in Tabella 3, si ritrovano già da tempo nello Statuto Normativo di alcuni Paesi stranieri; in Italia, invece, manca ad oggi una formulazione ufficiale, nonostante numerosi siano i gruppi di ricerca impegnati nel settore per la messa a punto di relazioni sperimentali capaci di interpretare, correttamente, la condotta di guida degli utenti su strade extraurbane.

Tabella 4_ Definizione delle Variabili Indipendenti poste in Tabella 3

VARIABILE INDIPEDENTE	CARATTERISTICA DEFINITA
ADT	<i>traffico giornaliero medio</i> , in veic/ giorno
CCR _s	<i>tasso di variazione della curvatura della singola curva che precede il rettifilo</i> , in gon/km
CCR	<i>tasso di variazione di curvatura del tronco omogeneo al quale la curva appartiene</i> , in gon/km
DC	<i>grado di curvatura</i> , in gradi / 100 m
DF	<i>angolo di deviazione</i> , in gradi
G ₁ , G ₂	<i>pendenza longitudinale e trasversale, rispettivamente</i> , in percentuale
L _c	<i>sviluppo della curva</i> , in metri
L _T , L _{T1} , L _{T2}	<i>sviluppo del rettifilo, di quello che precede e segue, rispettivamente</i> , in metri
L ₀	<i>distanza tra i punti d'intersezione orizzontale e verticale</i> , in metri
L _{AT} , L _{DT}	<i>sviluppo del rettifilo di approccio-curva ed allontanamento-curva, rispettivamente</i> , in metri
R	<i>raggio della curva</i> , in metri
R _a	<i>raggio della curva che precede</i> , in metri
TGM	<i>traffico giornaliero medio</i>
V _a	<i>velocità di approccio o di avvicinamento alla curva</i> , in km/h
V _d	<i>velocità desiderata</i> , in km/h
V _{env} o V _{amb}	<i>velocità ambientale</i> , in km/h
V _p	<i>limite di velocità imposto</i> , in km/h
V _T	<i>velocità di approccio per veicolo isolato in rettifilo</i> , in km/h

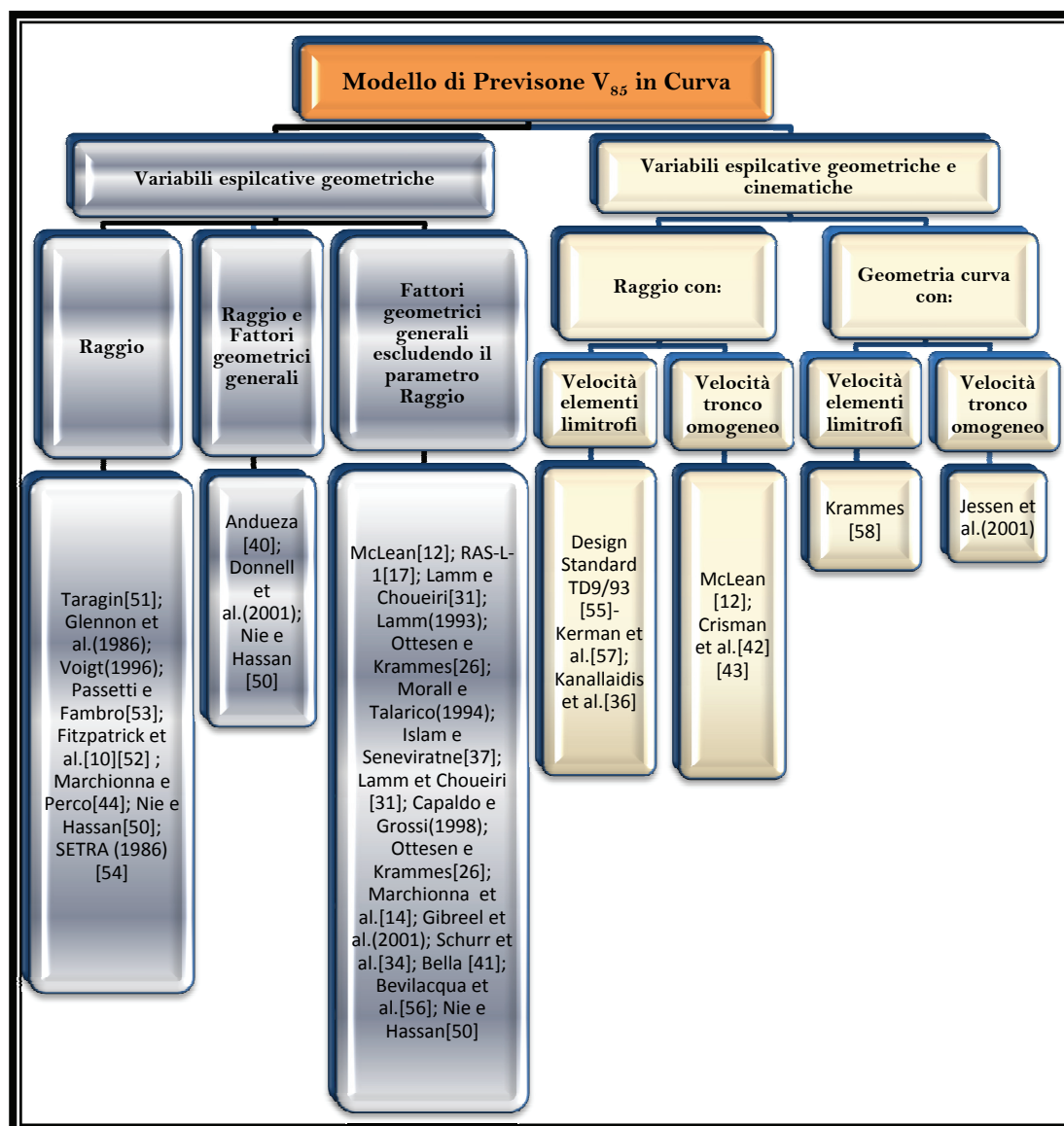


Figura 4 _ Suddivisione per classi dei Modelli di previsione della V_{85} in curva da Letteratura

2.3.3.4 Stima dei Tassi di Decelerazione ed Accelerazione

L'analisi del comportamento di guida degli utenti, in ingresso ed uscita dagli elementi curvilinei circolari, nasce negli anni cinquanta quando alcuni studiosi, come A. Taragin [51] e C. Holmquist [59], realizzarono le prime campagne sperimentali per il monitoraggio delle condizioni di traffico, al fine di stimare i reali tassi di decelerazione ed accelerazione, attinti dai guidatori, lungo le transizioni rettilo - curva - rettilo.

Nel 1981 le Norme Svizzere [15], riguardanti la Progettazione geometrica e funzionale delle strade, stabilirono che la costruzione dei profili delle velocità di

progetto era l'unico strumento per eseguire analisi di congruenza dei tracciati stradali. La direttiva prescriveva un valore costante del tasso di decelerazione ed accelerazione pari a $0,80 \text{ ms}^{-2}$.

Lamm presentò nel 1988 [60] una prima procedura per la costruzione di un profilo completo delle velocità, al fine di definire una metodologia compiuta per la valutazione della congruenza dei tracciati stradali. Lo studioso condusse rilievi sperimentali nel New York State, utilizzando la tecnica *car – following*. La ricerca condotta restituì un valore medio del tasso di decelerazione, impiegato dall'utente sul rettifilo di approccio - curva, pari a $0,85 \text{ ms}^{-2}$ uguale a quello di accelerazione, in uscita dalla curva, e stabilì che gli elementi curvilinei circolari fossero, in ogni caso, percorsi a velocità costante.

Krammes et al. [61] idearono una procedura, per la costruzione di un profilo completo delle velocità operative, adoperando il valore del tasso di decelerazione ed accelerazione proposto da Lamm et al. [62]. Successivamente, Collins e Krammes [47] analizzarono il comportamento di guida degli utenti, nella fase di approccio ed allontanamento curva, su 138 curve circolari e 78 rettifili, per un totale di 10 tronchi di strada extraurbana localizzati nel Texas. Il rilievo sperimentale delle velocità fu compiuto con sensori fotoelettrici ad infrarosso. Il tronco stradale geometrico analizzato era compreso tra i primi 240 metri, antecedenti la sezione d'inizio - curva (PC), ed i successivi 240 metri, a partire dalla sezione di fine - curva (PT); in particolare i siti monitorati sia sul rettifilo di approccio che di allontanamento - curva distavano reciprocamente 60 metri. I ricercatori, al fine di localizzare la reale zona di transizione per ciascuna curva circolare, costruirono i profili di velocità operativa sia per la fase di avvicinamento del veicolo alla curva sia per la fase di allontanamento; in ascissa furono riportate le distanze, in metri, rispetto ad un'origine di riferimento che in fase di avvicinamento coincideva con la sezione di inizio - curva, mentre in fase di allontanamento con la sezione di fine - curva. Le distanze assumevano segno positivo quando il veicolo transitava in rettifilo, negative quando si spostava in curva, come mostrato in Figura 5.

L'analisi dei profili di velocità operativa consentì di visualizzare, più chiaramente, la zona di transizione per ciascuna curva.

I ricercatori limitarono, a seguito delle osservazioni sperimentali, il calcolo del tasso di decelerazione ad un intervallo compreso tra i 60 metri di rettifilo che precedevano la sezione PC ed il primo quarto di sviluppo della curva stessa, mentre il calcolo del tasso di accelerazione ad un intervallo chiuso tra la sezione di fine - curva ed i successivi 120 metri di rettifilo.

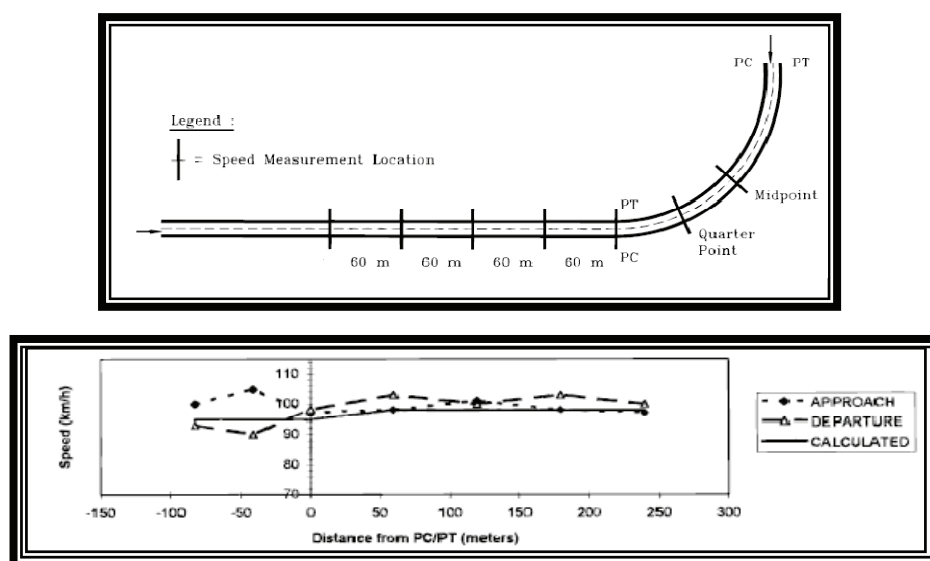


Figura 5_Piano di sezionamento e Profilo di velocità [47]

Il valore del tasso di decelerazione ed accelerazione, associato a ciascun elemento curvilineo circolare, fu stimato come differenza del massimo valore di velocità operativa sul rettifilo di approccio e allontanamento- curva, rispettivamente, e del minimo valore di velocità operativa, attinto in curva. Gli autori riscontrarono che il moto decelerato ed accelerato non interessava esclusivamente il rettifilo ma coinvolgeva lo stesso elemento circolare attiguo anche se in minore misura.

Le sperimentazioni furono suddivise per classi:

- 1) campione che includeva i 10 siti
- 2) campione che includeva solo i siti a bassa curvatura
- 3) campione che includeva solo i siti a media curvatura
- 4) campione che includeva solo i siti ad alta curvatura
- 5) campione che includeva solo i siti privi di intersezioni nelle vicinanze

L'analisi restituì un valore medio del tasso di decelerazione pari a $0,53 \text{ ms}^{-2}$ che non risultava essere statisticamente differente, per un fissato livello di significatività α pari al 5%, da $0,85 \text{ ms}^{-2}$ [62]; il tasso medio di accelerazione osservato assunse, invece, valore pari a $0,29 \text{ ms}^{-2}$ che si rivelò essere statisticamente differente da $0,85 \text{ ms}^{-2}$ [62].

Fitzpatrick et al. [10] svilupparono nel 2000 una vasta campagna sperimentale orientata all'analisi dei tassi di decelerazione ed accelerazione. Le velocità furono rilevate con un Lidar gun su un campione di 21 curve circolari, appartenenti a strade extra urbane, con un raggio compreso tra 175m e 873m, e sui rispettivi rettifili di approccio ed allontanamento curva. La ricerca evidenziò come la fase di avvio - decelerazione, per l'ingresso in curva, cominciasse a non più di 200m dalla sezione di inizio - curva, e rilevò, in aggiunta, un valore medio dei tassi sensibilmente differente da sito a sito,

diversamente da quanto presentato da alcuni studiosi [62]. I ricercatori, nell'ambito del programma IHSDM - Interactive Highway Safety Design Model- calibrarono un modello di previsione del tasso di decelerazione e definirono una coppia di valori costanti del tasso, per un fissato intervallo di variazione del raggio, come illustrato in Tabella 5.

Tabella 5 Modello di decelerazione proposto da Fitzpatrick [10]

d [ms⁻²] = 0,6794 – 295,14	175 m ≤ R < 436 m
0,00 ms⁻²	R ≥ 436 m
1,00 ms⁻²	R < 175 m

Krammes ed Ottesen [26], Fitzpatrick e Collins [52], nel corso di una successiva analisi dimostrarono che le azioni di decelerazione ed accelerazione si sviluppavano, in larga misura, sui tronchi rettilinei prossimi alle curve circolari che, al contrario, venivano percorse, pressochè, a velocità costante.

In Italia, invece, il Decreto Ministeriale 5/11/2001 [7], che disciplina i criteri di progettazione e verifica delle nuove Infrastrutture, predispone un'analisi della correttezza del progetto elaborato, mediante la rappresentazione grafica dell'andamento delle velocità di progetto. Il modello semplificato, per la costruzione del profilo delle velocità, si basa sulle seguenti ipotesi:

- In rettilifo, sugli archi di cerchio con raggio non inferiore a $R_{2,5}$ e lungo le clotoidi di transizione rettilifo – curva - rettilifo, le velocità di progetto tendono al limite superiore dell'intervallo
- Gli spazi di accelerazione, conseguenti all'uscita da una curva circolare, e quelli di decelerazione, per l'ingresso in detta curva, ricadono soltanto sulle clotoidi, sui tronchi in rettilineo e sulle curve di ampio raggio con $R > R_{2,5}$
- La velocità è costante lungo tutto lo sviluppo delle curve circolari con raggio inferiore a $R_{2,5}$
- I valori dell'accelerazione e della decelerazione restano determinati in $0,80 \text{ ms}^{-2}$
- Le pendenze longitudinali non influenzano le velocità di progetto degli elementi

La lunghezza Δ_T della zona di transizione, in particolare, è definita come la lunghezza sulla quale la velocità, conformemente al modello teorico ammesso, passa dal valore V_{p1} a V_{p2} , competenti a due elementi che si succedono. La Norma prevede che la transizione si sviluppi, come citato al precedente punto due, solo lungo le clotoidi ed, eventualmente, anche su parte dei rettifili adiacenti, qualora lo sviluppo, valutato secondo l'espressione (11), superi quello delle spirali clotoidiche orizzontali:

$$\Delta_T = \frac{\Delta V \cdot V_m}{12,96 \cdot a} \quad (11)$$

dove

Δ_T = lunghezza zona di transizione, in m

ΔV = differenza di velocità ($V_{p1} - V_{p2}$), in km/h

V_m = velocità media tra due elementi, in km/h

a = tasso di accelerazione e/o decelerazione pari 0,8, in ms⁻²

Secondo la Norma cogente [7] il conducente può apprezzare, inoltre, una variazione di curvatura dell'asse e modificare la velocità solo all'interno di una *distanza* detta *di riconoscimento*.

La distanza di transizione deve possedere, pertanto, in caso di decelerazioni una lunghezza non superiore alla distanza di riconoscimento che dovrà essere inferiore alla distanza di visuale libera nel tratto che precede la curva circolare, affinché la variazione di curvatura sia effettivamente percepita.

Il gruppo di ricerca dell'Università di Trieste [63] ha focalizzato, nel corso degli anni, l'attenzione su molteplici e differenti argomenti tra cui l'analisi del comportamento di guida degli utenti lungo le transizioni rettilineo – curva - rettilineo.

I rilievi di velocità condotti hanno riguardato dieci siti, raggruppati in 6 differenti tipologie su strade extraurbane ad unica carreggiata, prive di raccordi clotoideici planimetrici di transizione e localizzate nel Nord - Est Italia.

I rilievi sono stati eseguiti con un Lidar gun, occultato alla vista dei conducenti per non alterare le abituali performance, sistemato di fronte al veicolo (case A - Figura 6) o alle sue spalle (case B - Figura 6).

Il vantaggio della prima posizione è connesso alla maggiore vicinanza del veicolo, nel suo passaggio in curva, allo strumento, restituendo una migliore stima del tasso di decelerazione e/o accelerazione.

La seconda posizione, invece, è utilizzata quando non si rileva in prossimità della curva un buon rifugio per lo strumento.

Le misure di velocità sono state realizzate in condizioni di flusso libero, strada asciutta e luce diurna; i rettilinei di approccio – curva sono stati suddivisi in intervalli di ampiezza pari a 20 metri, come mostrato in Figura 6, ed in corrispondenza di ciascuna sezione monitorata è stata stimata, per senso di marcia, la velocità media V_m ed operativa V_{85} .

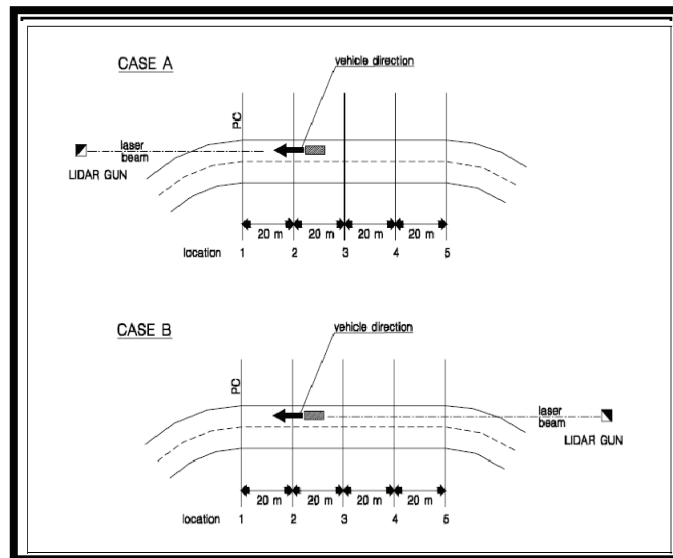


Figura 6_ Posizione strumento per rilievo delle velocità [63]

Le grandezze cinematiche sono state, in seguito, riportate in diagramma, come in Figura 7, dove in ascissa si ritrovano le distanze, in metri, delle sezioni osservate da uno zero coincidente con la sezione d'inizio curva (PC). Quando il veicolo è in movimento sul rettilineo di approccio – curva le distanze si conteggiano positivamente, altrimenti negativamente, se il moto è interno alla curva.

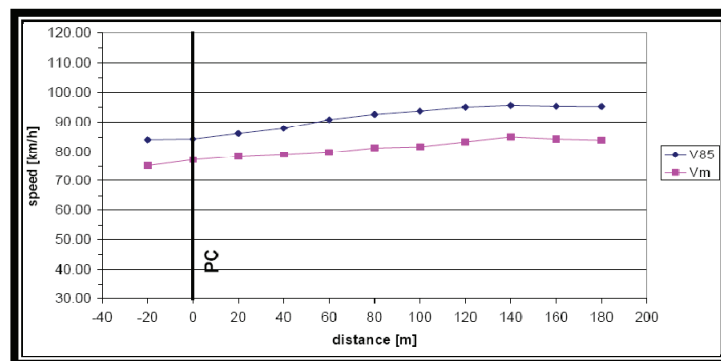


Figura 7_ Esempio di Diagramma delle velocità in approccio – curva [63]

I ricercatori hanno suggerito, pertanto, due procedure per elaborare le misure di velocità rilevate: la prima si basa sulla definizione, per singola sezione monitorata, della velocità media ed operativa, pervenendo ad una stima dei tassi di decelerazione ed accelerazione come differenza di velocità, su un tronco pari ad “L”; la seconda, invece, misura la decelerazione e/o accelerazione per singolo utente sul tronco di transizione “L” e, successivamente, ne stima l’85° percentile della distribuzione dei tassi.

Il gruppo di ricerca ha schematizzato in tre tipologie i differenti profili di velocità costruiti, come mostrato in Figura 8 e, per ognuna di esse, è stata illustrata la procedura per la definizione dei tronchi di transizione, come descritto in Tabella 6.

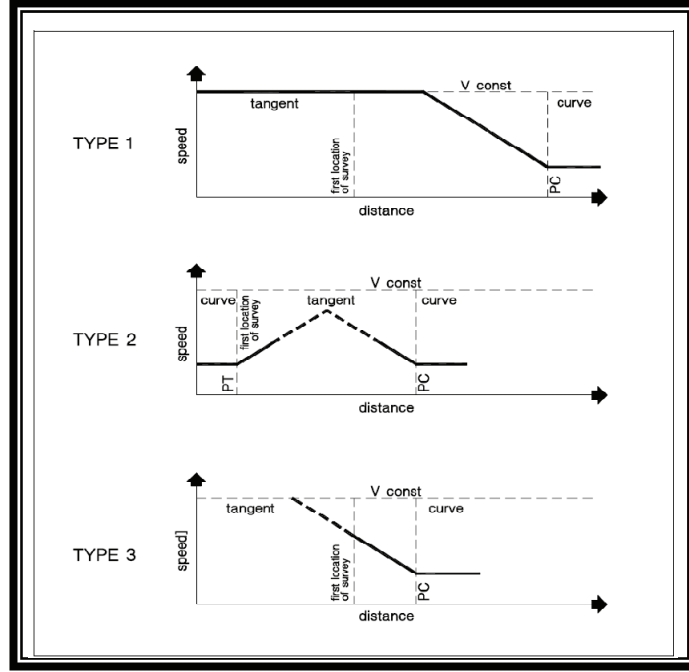


Figura 8_ Tipologie di Profili di velocità operativa [63]

La prima procedura descritta in Tabella 6 restituisce per ciascun sito la stima di due valori del tasso di decelerazione funzione della velocità operativa e media, secondo le espressioni (12) (13):

$$dec_{V_{85}} = \frac{V_{85 \max}^2 - V_{85 \min}^2}{2 \cdot L} \quad (12)$$

$$dec_{V_m} = \frac{V_{m \max}^2 - V_{m \min}^2}{2 \cdot L} \quad (13)$$

dove

L = *sviluppo del tronco di transizione associato all'elemento curvilineo circolare, definito secondo le procedure illustrate in Tabella 6, in metri*

$V_{85 \max}$ = *massimo valore registrato dell'85° percentile della distribuzione delle velocità sul tronco di transizione "L", in km/h*

$V_{85 \min}$ = *minimo valore registrato dell'85° percentile della distribuzione delle velocità sul*

tronco di transizione “L”, in km/h

$dec_{V_{85}}$ = *tasso di decelerazione, attinto sul tronco di transizione “L” e associato al generico sito, stimato in funzione della differenza di velocità operativa, in ms⁻²*

V_{m_max} = *massimo valore registrato della velocità media sul tronco di transizione “L”, in km/h*

V_{m_min} = *minimo valore registrato della velocità media sul tronco di transizione “L”, in km/h*

dec_{V_m} = *tasso di decelerazione, attinto sul tronco di transizione “L” associato al generico sito, stimato in funzione della differenza di velocità media, in ms⁻²*

La seconda procedura si è focalizzata sull’analisi del comportamento di guida del singolo utente in approccio – curva. E’ stato determinato il tasso di decelerazione, per ciascun conducente “ d_{85m} ” ed in seguito per ogni sito ne è stato stimato il valore medio e l’85° percentile della distribuzione dei tassi.

Tabella 6 Procedura per la valutazione delle zone di transizione [63]

PROFILO TIPO DI VELOCITÀ	PROCEDURA PER LA DEFINIZIONE DEL TRONCO DI TRANSIZIONE
1. Presenza di curve di piccolo raggio ,percorse a velocità costante, e precedute da rettifili molto lunghi sui quali si attinge e si mantiene una velocità desiderata. La decelerazione, per l’ingresso in curva, e l’accelerazione, in uscita dalla curva, si sviluppano solo sui rettifili di approccio ed allontanamento, su un tratto di lunghezza “L”, che precede la sezione inizio - curva (PC) e fine - curva (PT), rispettivamente	<ul style="list-style-type: none"> • Individuazione sul rettillo di approccio – curva di un tronco percorso a velocità media pressoché costante e distante almeno 200m dalla sezione PC • Definizione per ciascuna sezione sul rettillo di approccio - curva, a distanza inferiore od uguale a 200m dalla sezione PC, della V_{85} e V_m • T-test su ciascuna sezione individuata al punto precedente per verificare quale sia la sezione con V_m non differente statisticamente (fissato un livello di significatività $\alpha < 5\%$) dalla V_m rilevata sul rettillo di approccio- curva • La sezione individuata dal t-test localizzerà il punto d’inizio decelerazione che terminerà in PC; la distanza tra le due sezioni definirà il tronco di transizione di sviluppo pari ad “L”

<p>2. Presenza di curve percorse a velocità costante e precedute da rettifili brevi sui quali non si raggiunge la velocità desiderata. Il tratto percorso in accelerazione e decelerazione si sviluppa in rettilineo, come nel primo caso</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Definizione sul rettilineo di approccio – curva della velocità media V_m ed individuazione del massimo valore rilevato della velocità media V_{m_max} • T-test su ciascuna sezione localizzata sul rettilineo di approccio – curva per verificare quale sia la sezione con V_m non differente statisticamente (fissato un livello di significatività $\alpha < 5\%$) dalla V_{m_max} • La sezione individuata dal t-test localizzerà il punto d'inizio decelerazione che terminerà in PC; la distanza tra le due sezioni definirà il tronco di transizione di sviluppo pari ad "L"
<p>3. Presenza di curve percorse a velocità costante e precedute da rettifili brevi, dove si sviluppano le zone di transizione. La sezione d'inizio e fine - tronco "L" non è individuabile chiaramente perché situata alle spalle della prima sezione utile di rilevamento</p>	<p>I profili del terzo tipo sono dotati di un tratto percorso in decelerazione che nasce a monte della prima sezione di rilevamento; ciò giustifica la scelta di voler posizionare il punto d'inizio decelerazione nella prima sezione utile monitorata sul rettilineo di approccio - curva</p>

I risultati ottenuti confermano che un tasso di decelerazione costante, pari a $0,80 \text{ ms}^{-2}$, come suggerito dalla Normativa Italiana [7] e Svizzera [15], è una scomoda semplificazione della realtà, visto la sua variabilità con i diversi aspetti geometrici della strada.

È stato appurato dai ricercatori con un t – test, per un fissato livello di significatività $\alpha < 5\%$, che il valore medio dec_{r85} è statisticamente differente da $d_{85\%}$ e da $0,85 \text{ ms}^{-2}$ [62]; al contrario il valore medio $d_{85\%}$ non è statisticamente differente da $0,85 \text{ ms}^{-2}$, per un fissato livello di significatività $\alpha < 5\%$, presentandosi sensibilmente più grande di dec_{r85} .

I risultati dell'analisi dimostrano, in ogni caso, che le variazioni di velocità avviate dall'utente per "negoziare" una curva, non trovano spazio unicamente sul rettilineo di approccio ma proseguono sulla stessa anche se con gradienti inferiori.

Lo stesso gruppo di ricerca nel 2007 [64] ha presentato un'applicazione delle procedure, in precedenza esposte, su un campione di dimensioni maggiore: sono stati

annessi ai 10 siti esaminati, ulteriori 8, appartenenti a 9 strade extraurbane a singola carreggiata con un volume di traffico mai superiore a 420veic/h, durante le ore di rilievo.

L'analisi sperimentale ha dimostrato che lo sviluppo medio del tronco "L", occupato dall'utente per decelerare, è pari a 101 m confermando i risultati di Fitzpatrick et al. [10]. I tassi di decelerazione, calcolati nell'ipotesi di moto uniforme lungo il tronco "L", si sono mostrati fortemente variabili da sito a sito e lungo i rettifili di approccio - curva, dove le decelerazioni attingono il loro massimo valore in prossimità della sezione d'inizio - curva (PC), come mostrato in Figura 9.

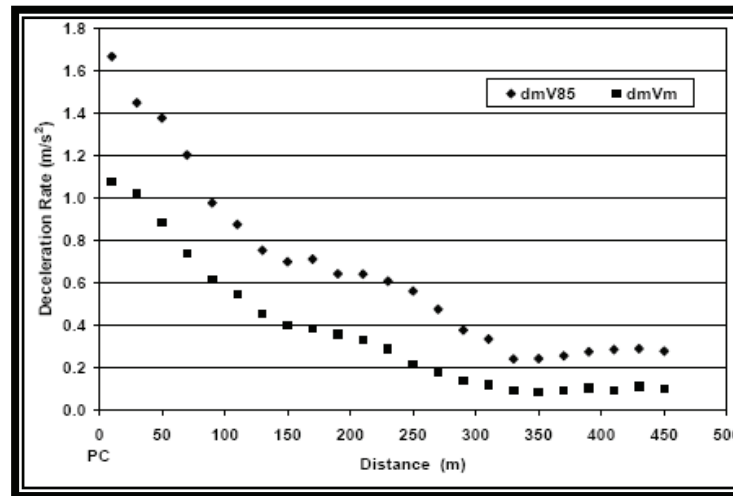


Figura 9_ Profilo dei tassi di Decelerazione [63]

Le due procedure hanno restituito un valore medio di dec_{r85} compreso tra 0,26 ms^{-2} e 1,25 ms^{-2} ; nel caso di curve con raggio inferiore a 100 m, il tasso dec_{r85} ha raggiunto valori superiori a 0,80 ms^{-2} . In ogni caso il valore medio assunto da dec_{r85} è pari a 0,69 ms^{-2} , superiore a 0,50 ms^{-2} ottenuto per dec_{rm} .

I ricercatori hanno verificato con un t-test che dec_{r85} è statisticamente differente da 0,85 ms^{-2} , confermando i risultati di Fitzpatrick et al. [10], e da 0,80 ms^{-2} , suggerito dagli Standard Italiani [7]. L'adozione, pertanto, di un tasso di decelerazione pari a 0,85 ms^{-2} e 0,80 ms^{-2} non rispecchia il reale comportamento dell'utente né la percezione del tracciato. La più vantaggiosa soluzione dimora nella calibrazione di un modello di previsione del tasso per evidenziare le reali variazioni di velocità col mutar del sito e dell'ascissa curvilinea.

Analisi di regressione lineare multi - variabile sono state formulate dallo stesso team di ricerca, pervenendo a due espressioni del modello di previsione del tasso di decelerazione, come da equazioni (14) e (15) con p -value dei coefficienti pari all'1%:

$$dm_{v85} = 1,7568 - 0,2217 \ln(R) \quad \rho^2 = 0,74 \quad (14)$$

dove

dm_{v85} = tasso di decelerazione valutato in base ad una differenza di velocità operativa, in ms^{-2}

R = raggio dell'elemento curvilineo circolare, in metri

$$dm_{v85} = 1,4223 - 0,0106 V_{85app} + 0,0146 (V_{85app} - V_{85min}) \quad \rho^2 = 0,66 \quad (15)$$

dove

dm_{v85} = tasso di decelerazione valutato in base ad una differenza di velocità operativa, in ms^{-2}

V_{85app} = 85° percentile della distribuzione delle velocità sul rettilo di approccio – curva su siti distanti non più 200m dalla sezione di inizio – curva, in km/h

V_{85min} = 85° percentile della distribuzione delle velocità a centro curva, in km/h

Gli autori hanno, successivamente, proposto per ciascun sito un'analisi del tasso di decelerazione circoscritto ai 40 metri che precedono la sezione PC, dove la manovra è percepita e rinvenuta più rischiosa, ottenendo valori più elevati.

F. Bella [65] ha esaminato il comportamento degli utenti con l'ausilio di un simulatore di guida, registrando su 26 possibili configurazioni delle transizioni rettilo – curva – rettilo 856 profili di velocità per ciascun guidatore, inerenti tre tipologie di strada extraurbana. I dati ottenuti sono stati elaborati secondo le due metodologie prima viste [63]: analisi dell'85° percentile della distribuzione dei tassi per ciascuna curva circolare, ed analisi dei tassi di decelerazione ed accelerazione come differenza di velocità operativa. I risultati hanno restituito un valore medio dell'85° percentile della distribuzione dei tassi di decelerazione (85dec) pari a $1,02 ms^{-2}$ ed accelerazione (85acc) pari a $0,50 ms^{-2}$. Tali valori, significativamente più alti di quelli derivanti dalla seconda procedura, sono risultati statisticamente differenti da $0,85 ms^{-2}$, al contrario di questa dove il valore medio del tasso di decelerazione (dec_{v85}) è risultato pari a $0,60 ms^{-2}$, mentre quello di accelerazione (acc_{v85}) pari a $0,31 ms^{-2}$. Entrambi i valori, stimati con l'ultima metodologia, sono risultati statisticamente inferiori a $0,85 ms^{-2}$.

Il ricercatore ha presentato sulla base dei valori stimati di 85_{dec} e 85_{acc} dei modelli di previsione con un coefficiente di determinazione maggiore del 50% e $p\text{-value} < 5\%$ di ogni variabile.

Il modello di previsione dell' 85_{dec} è rappresentato dalla seguente espressione (16):

$$85_{dec} = -1,316 + \frac{148,28}{R} + 0,015V_{85_{max\ at}} \quad \rho^2 = 0,592 \quad (16)$$

dove

R = Raggio dell'elemento curvilineo circolare, in metri

$V_{85_{max\ at}}$ = Velocità sul rettilineo di approccio - curva, in km/h

Il modello di previsione dell' 85_{acc} è rappresentato dalla seguente espressione (17):

$$85_{acc} = -0,567 + \frac{74,47}{R} + 0,007V_{85_{max\ dt}} \quad \rho^2 = 0,544 \quad (17)$$

dove

R = Raggio dell'elemento curvilineo circolare, in metri

$V_{85_{max\ dt}}$ = Velocità sul rettilineo di partenza - curva, in km/h

2.3.4 Modelli e metodi per la costruzione di un profilo completo delle velocità operative sull'intero sviluppo di un Tracciato geometrico stradale

Un gruppo di ricercatori della Purdue University [6] [66] ha presentato nel 2004, a seguito di estese campagne sperimentali, delle procedure per la rappresentazione del reale comportamento di guida dell'utente su strade extraurbane, impiegando, sinergicamente, i risultati delle analisi condotte sulle zone di transizione con quelle sui rettilinei e curve circolari.

Le misure di velocità sono state eseguite nello stato dell'Indiana dal maggio all'agosto del 2002 in condizioni di flusso libero, nelle ore diurne, in presenza di buone condizioni meteorologiche, su strade in piano e prive di raccordi clotoidici planimetrici di transizione tra rettilineo e curva. I rilievi hanno visto l'utilizzo di una pistola laser su

un totale di 158 sezioni, con un minimo di osservazioni utili per ciascuna pari a 100 ed un valore medio pari a 360.

La stima del reale tasso di decelerazione ed accelerazione, la ripartizione percentuale della transizione tra rettilineo e curva, è stata ottenuta per successive iterazioni con un procedimento ciclico, che a breve si descriverà.

In un primo momento gli studiosi hanno determinato il valore medio delle velocità in corrispondenza delle sezioni d'inizio (V_1) e fine – curva (V'_1), in prossimità di sezioni distanti dalle prime 91,4 m sul rettilineo (V_2) e sui rettilinei di approccio ed allontanamento curva al di fuori di quest'area (V_T). Sono stati, globalmente, monitorati 9 siti per la fase di decelerazione e 10 per quella di accelerazione.

Per ciascun sito è stato stimato sia il tasso di decelerazione spaziale che temporale, la lunghezza della zona di transizione e la ripartizione percentuale tra rettilineo e curva.

Gli autori hanno calibrato un modello di previsione delle velocità lungo le zone di transizione variando di volta in volta il numero delle sezioni coinvolte, fino alla convergenza dei risultati dopo due successive iterazioni ed il raggiungimento di un grado di determinazione dell'espressione accettabile.

Il modello di previsione delle velocità lungo i tronchi percorsi in decelerazione assume la seguente forma (18):

$$V_d = 0,682 [V_T - 0,6553 (V_T - V_C) + 0,03299 l_d] \quad (18)$$

dove

V_d = Velocità in una generica sezione del tratto percorso in decelerazione, in ft/s

V_T = Velocità osservata o stimata con modelli di previsione sul rettilineo di approccio - curva, in ft/s

V_C = Velocità osservata o stimata con modelli di previsione in curva, in ft/s

l_d = Distanza della sezione esaminata dalla sezione inizio – curva; assume valore positivo se la sezione è esterna alla curva, negativo se è interna, in ft

Il grado di determinazione associato al modello è pari all'84%, con un intervallo di confidenza per ciascun coefficiente pari al 99%; in particolare, il coefficiente 0,6553 indica che il 65,53% della decelerazione si sviluppa sul rettilineo di approccio - curva, mentre 0,03299 indica che il tasso medio di decelerazione spaziale è pari a 0,033 (ft/s)/ft.

Il modello di previsione delle velocità lungo i tronchi percorsi in accelerazione assume la seguente forma (19):

$$V_a = 0,682 [V_T - 0,7164 (V_T - V_C) + 0,02211 l_a] \quad (19)$$

dove

V_a = Velocità in una generica sezione del tratto percorso in accelerazione, in ft/s

V_T = Velocità osservata o stimata con modelli di previsione sul rettifilo di allontanamento – curva, in ft/s

V_C = Velocità osservata o stimata con modelli di previsione in curva, in ft/s

l_a = Distanza della sezione esaminata dalla sezione fine – curva; assume valore positivo se la sezione è esterna alla curva, negativo se è interna, in ft

Il grado di determinazione associato al modello è pari all'87,61%, con un intervallo di confidenza per ciascun coefficiente pari al 99%; in particolare, il coefficiente 0,7164 indica che il 71,64% della accelerazione totale si sviluppa sul rettifilo di allontanamento- curva, mentre 0,02211 indica che il tasso di decelerazione spaziale attinto è pari a 0,02211 (ft/s)/ft.

Le lunghezze complessive di transizione, percorse in decelerazione “ L_d ” ed accelerazione “ L_a ”, sono valutate, rispettivamente, con le seguenti relazioni (20) e (21):

$$L_d = \frac{V_C - V_{Td}}{d} \quad (20)$$

$$L_a = \frac{V_{Ta} - V_C}{a} \quad (21)$$

dove

L_d = sviluppo tronco di decelerazione, in piedi

V_C = Velocità stimata in curva con il modello (23), in ft/s

V_{Td} = Velocità stimata sul rettifilo di approccio – curva, in ft/s

d = tasso di decelerazione spaziale stimato, in ft/s/ft

L_a = sviluppo tronco di accelerazione, in piedi

V_{Ta} = Velocità stimata sul rettifilo di allontanamento – curva con il modello (22), in ft/s

a = tasso di accelerazione spaziale stimato, in ft/s/ft

L'individuazione dello sviluppo delle zone di transizione, per ciascun elemento curvilineo circolare, ha concesso ai ricercatori di calibrare e tarare, con i restanti valori i modelli di previsione delle velocità su rettilineo e curva; in particolare, dopo aver tracciato il profilo delle velocità medie, le curve orizzontali sono state suddivise in *flat* e *sharp*, a seconda se il raggio fosse stato superiore od inferiore a 518m. Le curve *flat* sono state aggiunte al data – base dei rettilinei.

I modelli di previsione su rettilineo e curva sono stati ottenuti con l'ordinaria tecnica di regressione dei minimi quadrati, restituendo una stima della velocità dal 5° al 95° percentile con incrementi di 5, al variare della progressiva stradale.

Il modello di previsione delle velocità in rettilineo, in particolare, è associato ad un coefficiente di determinazione pari al 90% ed un livello di confidenza, per ciascun coefficiente, pari all'82,4%; la forma è mostrata dalla seguente espressione (22):

$$V_p = 57,137 - 3,082 PSL_{50} - 0,071 T - 0,131 G - 1,003 RES + 2,38 \cdot 10^{-3} SD - 1,67 \cdot 10^{-6} SD^2 - 0,422 INT + 0,040 PAV + 0,394 GSW + 0,054 USW - 2,233 FC + 5,982 Z_P + 1,428 (Z_P PSL_{50}) + 0,061 (Z_P GR) + 0,292 (Z_P INT) - 0,038 (Z_P PAV) - 0,012 (Z_P CLR) \quad (22)$$

dove

V_p = *percentile i-esimo calcolato in una generica sezione in rettilineo*, in miglia/h

PSL_{50} = *fattore uguale ad 1 se il limite di velocità è 50 miglia/h, 0 se il limite di velocità è di 55miglia/h*

T = *percentuale dei mezzi pesanti in condizione di flusso libero*, in percentuale

G = *pendenza longitudinale*, in percentuale

RES = *fattore pari ad 1 se la densità degli accessi per miglia è uguale o superiore a 10, 0 in altro caso*

SD = *distanza di visibilità*, in piedi

INT = *fattore pari ad 1 se la sezione considerata dista meno di 350 piedi da un'intersezione, 0 in altro caso*

PAV = *larghezza della carreggiata pavimentata*, in piedi

GSW = *larghezza totale della banchina pavimentata per entrambe le direzioni di marcia*, in piedi

USW = *larghezza totale della banchina non pavimentata per entrambe le direzioni di marcia*, in piedi

FC = *fattore pari ad 1 se la sezione esaminata è localizzata su una curva flat, 0 in altro caso*

LC = *distanza della strada dai confini laterali*, in piedi

Z_P = *variabile normale standardizzata corrispondente al percentile p selezionato*

Il modello di previsione delle velocità sulle curve *sharp* è associato ad un coefficiente di correlazione pari al 93,2% ed un livello di confidenza, per ciascun coefficiente, pari al 95%; la forma è mostrata dalla seguente espressione (23):

$$V_p = 47,664 + 3,44 \cdot 10^{-3} SD - 2,639 RES - 2,541 DC + 7,954 SE - 0,624 SE^2 + 4,158 Z_P + 0,236 (Z_P DC) - 0,199 (Z_P SE) \quad (23)$$

dove

V_p = *percentile i-esimo calcolato in una generica posizione in curva*, in miglia/h

DC = *grado di curvatura*, in gradi

SE = *pendenza trasversale*, in percentuale

L'uso congiunto dei quattro modelli favorisce la costruzione di un profilo completo delle velocità lungo l'intero sviluppo del tracciato stradale, restituendo il percentile desiderato al variare della progressiva.

I ricercatori italiani A. Marchionna e P. Perco. [44] hanno concepito nel 2007 una procedura analoga per la costruzione completa del profilo delle velocità operative che illustra il comportamento di guida dell'utente in condizioni di flusso libero, su rettifili, curve circolari e spirali di transizione.

I rilievi di velocità [63], eseguiti su strade asciutte in condizioni di luce diurna, sono stati condotti con un Lidar gun ed hanno interessato 19 strade extraurbane, localizzate su terreni sia pianeggianti che ondulati, con pendenza longitudinale massima del 4%, in presenza di spirali di transizione orizzontali. Sono state esaminate sezioni in rettilineo e a centro - curva; in particolare, sono stati monitorati 18 elementi circolari, per l'analisi delle decelerazioni, e 20 per quella delle accelerazioni, raggiungendo, in ogni caso, un numero utile di osservazioni per sito pari a 100 veicoli isolati.

Gli autori, preliminarmente alla definizione dei modelli di previsione, hanno suddiviso l'asse geometrico stradale in tronchi omogenei sulla base della valutazione del CCR (tasso di variazione della curvatura – §2.3.1) ed hanno definito, per ciascun sito, il valore del tasso di decelerazione ed accelerazione secondo due metodologie, già ampiamente trattate in un loro precedente lavoro sperimentale [64].

La procedura proposta si compone delle seguenti parti:

- Modello di previsione della velocità desiderata, secondo l'espressione (24), sui rettifili indipendenti con sviluppo maggiore di 500m, e su curve di ampio raggio

$$V_{\text{des}} = 123,54 - 2,79 \text{ CCR}^{0,47} \quad (\rho_2 = 0,76) \quad (24)$$

dove

$V_{\text{des}} = \text{Velocità desiderata costante, in km/h}$

$\text{CCR} = \text{tasso di variazione della curvatura in gon/km}$

- Modelli di previsione della velocità operativa su curve orizzontali circolari, suddivisi in quattro gruppi, come mostrato in Tabella 7, in funzione del tasso di variazione di curvatura del tronco omogeneo (CCR) e della velocità desiderata

Tabella 7 Modelli di previsione della V_{85} in curva

Range CCR [gon/km]	Range di V_{des} [km/h]	Modello di Previsione V_{85C} [km/h]	ρ^2
< 30	>110	$V_{85} = 124,08 - 563,78 / R^{1,2}$	0,40
30 - 80	110 - 100	$V_{85} = 118,11 - 510,56 / R^{1,2}$	0,58
80 - 160	100 - 90	$V_{85} = 111,65 - 437,44 / R^{1,2}$	0,80
>160	< 90	$V_{85} = 100,85 - 346,62 / R^{1,2}$	0,89

- Modello di previsione del tasso di decelerazione, secondo l'espressione (25), ed accelerazione, secondo l'espressione (26), determinati in base alla differenza di velocità operativa [64]

$$d = 1,757 - 0,222 \text{ Ln}(R) \quad (\rho_2 = 0,74) \quad (25)$$

dove

$d = \text{tasso di decelerazione temporale, in ms}^{-2}$

$R = \text{Raggio dell'elemento curvilineo circolare, in metri}$

$$a = 1,328 - 0,159 \text{ Ln}(R) \quad (\rho_2 = 0,45) \quad (26)$$

dove

a = tasso di accelerazione temporale, in ms^{-2}

R = Raggio dell'elemento curvilineo circolare, in metri

- Regole per l'applicazione dei modelli
 - ⌘ Suddivisione del tracciato in tronchi geometrici omogenei, funzione del CCR
 - ⌘ Velocità operativa sui rettifili indipendenti, sulle spirali di transizione e sulle curve di ampio raggio stimata con la (24)
 - ⌘ Velocità operativa in curva costante, determinata con una delle quattro equazioni mostrate in Tabella 7
 - ⌘ Fasi di accelerazione e decelerazione sviluppate solo sui rettifili e sulle spirali
 - ⌘ Velocità operativa in curva inferiore a quella stimata sui rettifili limitrofi, in caso contrario limitata a quest'ultimo valore secondo la (24)
 - ⌘ Stima della zona di transizione L_{T1} , in metri, percorsa in accelerazione secondo la (27):

$$L_{T1} = \frac{V_{des}^2 - V_{85-n}^2}{2 \cdot a} \quad (27)$$

dove

V_{des} = Velocità desiderata costante sul rettifilo di allontanamento - curva, secondo la (24), in km/h

V_{85-n} = Velocità operativa in curva, come illustrato in Tabella 7, in km/h

a = Tasso di accelerazione, secondo la (26), in ms^{-2}

- ⌘ Stima della zona di transizione L_{T2} , in metri, percorsa in decelerazione secondo la (28):

$$L_{T2} = \frac{V_{des}^2 - V_{85-n+1}^2}{2 \cdot d} \quad (28)$$

dove

V_{des} = Velocità desiderata costante sul rettifilo di approccio - curva, secondo la (24), in km/h

V_{85-n} = Velocità operativa in curva, come illustrato in Tabella 7, in km/h

$d = \text{Tasso di decelerazione, secondo la (25), in ms}^{-2}$

∞ Valutazione della lunghezza critica di un rettifilo, L_{LIM} , in metri, affinché si raggiunga la velocità costante desiderata, secondo la (29):

$$L_{LIM} = L_{T1} + L_{T2} \quad (29)$$

L'uso congiunto dei diversi modelli ha fornito gli strumenti per formulare procedure finite per il tracciamento completo di un profilo continuo delle velocità operative.

CAPITOLO 3. RETE DI STUDIO

3.1 Introduzione

L'Ufficio Trasporti dell'Ente provinciale di Salerno ha intrapreso dal 1999 un'estesa campagna di monitoraggio delle condizioni di traffico veicolare, nell'ambito di un progetto finalizzato alla pianificazione dinamica delle strategie di assetto della viabilità suburbana ed extraurbana, e degli interventi per il miglioramento della sicurezza stradale.

Le azioni di monitoraggio rappresentano in linea generale per un Ente gestore un prezioso strumento per l'individuazione delle criticità del sistema e la validazione degli effetti indotti da un intervento.

Gli ingenti costi umani e sociali, connessi ai fenomeni d'incidentalità¹, hanno spinto, nel corso dell'ultimo ventennio, ricercatori di tutto il mondo alla messa a punto di procedure per il miglioramento della sicurezza stradale; in tal senso si sono registrati perfezionamenti nelle normative di settore di molti Paesi, non esclusa l'Italia.

Il Nuovo Codice della Strada [67] e la Bozza per gli Interventi di Adeguamento delle Strade Esistenti [8] prevedono che gli Enti gestori di un'infrastruttura adottino campagne di monitoraggio per l'analisi del comportamento di guida dell'utente e delle relazioni che ne regolano la sua interazione con la strada.

In quest'ottica devono interpretarsi le campagne sperimentali programmate ed eseguite dalla Sezione Strade del Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II", in collaborazione con la Provincia di Salerno, e quanto svolto, pertanto, nell'ambito del presente lavoro di ricerca. Una delle prime fasi di monitoraggio, in particolare, fu sviluppata nel corso del biennio 2003 – 2004, dove il piano di sezionamento fu predisposto per esaminare il comportamento di guida dell'utente su strada extraurbana. Nel corso della campagna sperimentale più di 80 infrastrutture furono analizzate, di cui una parte non strettamente di competenza della Provincia di Salerno (Strade Statali), a riprova della volontà di agire per il miglioramento delle caratteristiche dell'intera rete.

Una campagna di monitoraggio più articolata, rispetto a quella sviluppata negli anni 2003 e 2004, fu attuata nel 2006 con l'adozione di apparecchiature a lettura ottica ad elevate prestazioni. In questa fase sezioni di rilevamento in posizione strategica

¹ Secondo fonti del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, nel 2004 il costo a carico della collettività dovuto all'incidentalità stradale è stato pari al 2,2% del P.I.L. (*Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti – Anno 2004*).

furono predisposte lungo i corridoi stradali per il rilievo delle velocità su rettilifo, curva e transizione rettilifo – curva – rettilifo; una parte di queste infrastrutture monitorate costituisce, ad oggi, la base campionaria per il lavoro di ricerca qui presentato.

3.2 Strade monitorate e caratteristiche geometriche rilevate

La campagna di monitoraggio realizzata nel 2006 è stata eseguita in condizioni di flusso libero, luce diurna e strada asciutta coinvolgendo 517 sezioni e implicando l'utilizzo di due apparecchiature a lettura ottica, ciascuna in ogni sezione osservata per un minimo di due ore fino ad un massimo di tre.

Tutte le Infrastrutture selezionate per la ricerca in esame appartengono alla Rete della viabilità ordinaria della Provincia di Salerno; in particolare, 256 sezioni appartengono a strade monitorate nella Piana del Sele (S.P. 30B, S.P. 262, S.P. 204, S.P. 312 e S.P. 30A), mentre 261 sezioni a strade nel Vallo di Diano (S.P. 52, S.S. 19 ter, S.S. 426 e S.S. 166).

In realtà, l'analisi sperimentale condotta coinvolge solo una parte delle sezioni enunciate per un totale di 401, distribuendosi sulle strade S.P. 30B, S.P. 262, S.P. 312, S.P. 52, S.S. 426 e S.S. 166. Su alcune infrastrutture non registrandosi in corrispondenza delle sezioni monitorate un flusso libero del traffico, è stato necessario estrometterle dal campione d'analisi; per esempio, sulle S.P. 30A e S.P. 204 il volume di traffico rilevato è risultato superiore a 650 veic. / (h-corsia).

La condizione di veicolo isolato è fondamentale per gli scopi cui la ricerca si rivolge al fine di stimare l'85° percentile della distribuzione delle velocità.

Alcune strade, invece, in fase di monitoraggio si sono presentate a tal punto pericolose per gli operatori (S.S. 19 ter) da rendere impossibile le operazioni di rilievo e quindi anch'esse escluse dall'analisi dei dati.

Il programma di Conteggio del Traffico e Rilievo delle Velocità ha comportato una successiva campagna nel 2007, dove un congruo numero di strade statali e provinciali sono state monitorate tra cui la S.S. 103, localizzata nel Vallo di Diano, e la S.P. 135, localizzata nella Piana del Sele, divenute, poi, oggetto d'analisi del presente lavoro.

L'andamento planimetrico delle strade oggetto d'analisi, come illustrato nelle aerofotogrammetrie in Figura 10, presenta un andamento scorrevole con rettifili di notevole lunghezza, assenza di curve planimetriche di transizione rettilifo – curva – rettilifo e pendenze longitudinali pressoché nulle. Il volume di traffico durante le ore di

rilievo non ha mai superato in corrispondenza delle sezioni monitorate i 400 veicoli/ora/corsia.

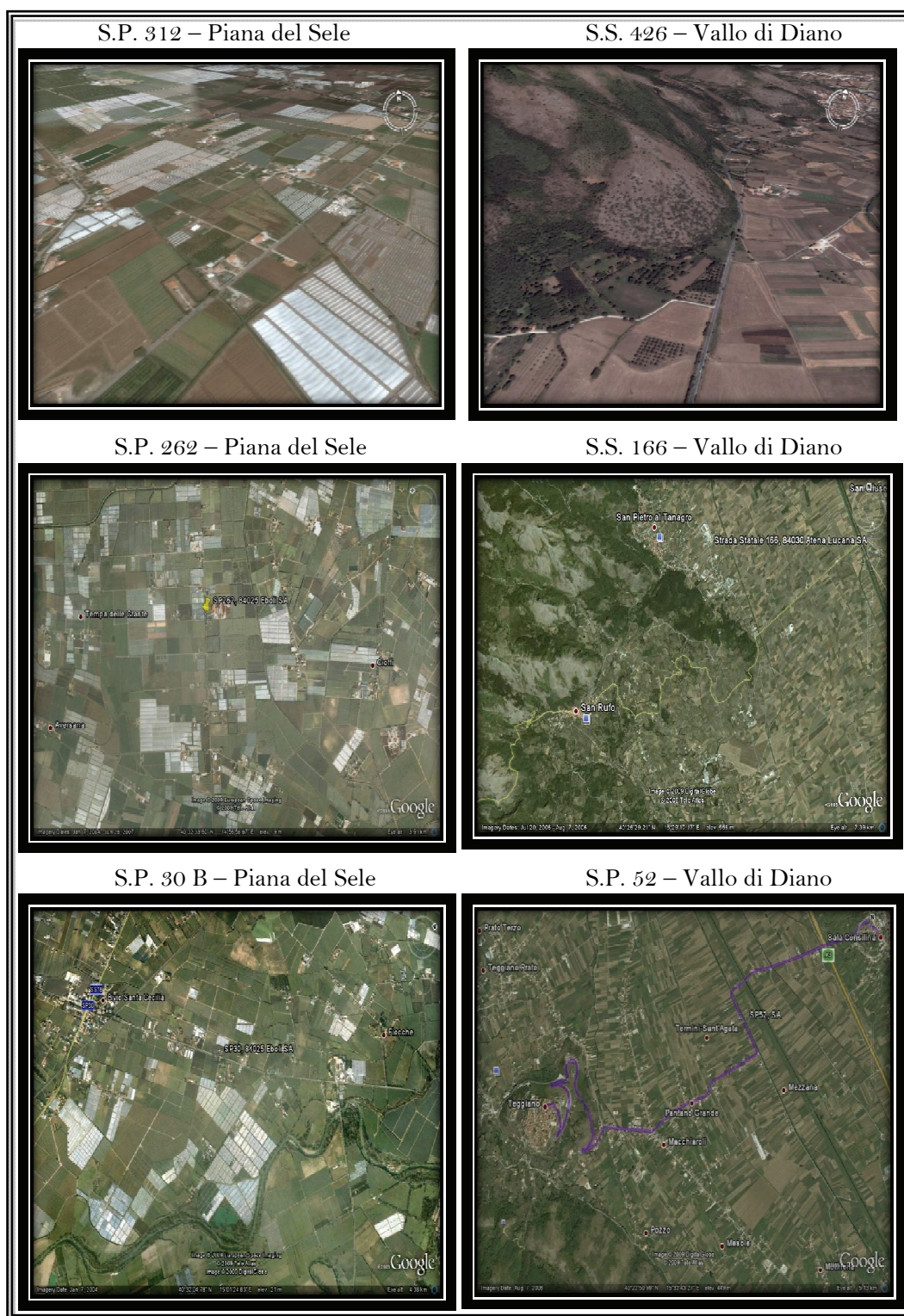


Figura 10_ Aerofotogrammetria delle Strade esaminate

Le caratteristiche geometriche e cinematiche dei tracciati stradali esaminati sono di seguito descritte:

- *Larghezza della carreggiata (banchina con corsie di marcia)*, in metri
- *Raggio dell'elemento curvilineo circolare*, in metri
- *Raggio della curva circolare che precede un generico elemento del tracciato geometrico stradale*, in metri
- *Tasso di variazione di curvatura del tronco omogeneo – CCR* - definito come somma dei valori assoluti degli angoli di deviazione, lungo lo sviluppo orizzontale del tracciato, diviso la lunghezza della strada, in gon/km²
- *Tasso di variazione di curvatura del singolo elemento curvilineo circolare – CCRs* - definito come somma dei valori assoluti degli angoli di deviazione, lungo lo sviluppo orizzontale della curva circolare, diviso la lunghezza dell'elemento, in gon/km
- *Sviluppo dei rettifili e delle curve circolari*, in metri
- *Sviluppo del rettifilo che precede ogni generico elemento geometrico del tracciato*, in metri
- *Velocità media rilevata in ogni sezione monitorata – V_m* - , in km/h
- *Velocità operativa in ogni sezione monitorata, valutata come 85° percentile della distribuzione delle velocità – V_{85}* - , in km/h

3.3 Strumentazione utilizzata

L'apparecchiatura utilizzata per il rilievo delle velocità è un contatraffico “KV Laser” di fabbricazione SODI Scientifica. Il principio di funzionamento del Lidar gun è basato sull'emissione e sulla ricezione di una coppia di raggi laser, diretti perpendicolarmente all'asse geometrico stradale; i raggi laser, in particolare, sono a bassa potenza e si presentano, di conseguenza, innocui per gli occupanti dei veicoli.

Il KV Laser si compone di un sistema di rilevamento laser, di un software di rilievo - dati, di una batteria ricaricabile e di supporti per l'installazione. Lo strumento è stato installato su un cavalletto sistemato esternamente alla carreggiata, come illustra la Figura 11, ed opportunamente occultato alla vista dei conducenti che, rilevandone la presenza, avrebbero potuto alterare la loro condotta nell'attraversare la sezione monitorata, ipotizzando un controllo delle velocità da parte della Polizia Stradale.

² Un tronco omogeneo si caratterizza al massimo da una pendenza longitudinale. Le strade SP52, SP30b e SP312 sono state suddivise in due tronchi omogenei con due rispettivi valori di CCR [4].



Figura 11_Procedure di Rilevamento

Lo strumento registra per ciascun passaggio veicolare l'istante di transito (data, ora, minuti e secondi), la velocità (in km/h), la lunghezza (in metri) e la direzione di marcia; in particolare, la velocità istantanea è desunta dall'intervallo temporale associato al transito del veicolo dalla prima alla seconda fotocellula. Le misure di velocità non sono libere da errori, non superiori, comunque, al 10% e riconducibili a due circostanze:

- Intervallo temporale inferiore a 0,5 secondi tra passaggi consecutivi di veicoli, in direzione di marcia opposta, in corrispondenza della medesima stazione di misura
- Asse della coppia del raggio laser proiettato su superfici a basso potere di rifrazione

Il campione sperimentale è stato depurato delle misure di velocità riguardanti i mezzi pesanti ed i passaggi veicolari con distanziamento temporale inferiore ai cinque secondi tra due successivi veicoli in marcia. Tali condizioni sono necessarie per garantire flusso libero alla corrente veicolare in marcia analizzata [4].

La mole dei dati da filtrare ha richiesto l'utilizzo di algoritmi sviluppati in ambiente *VBA (Visual Basic for Applications)* [4].

Sono state predisposte delle schede sintetiche per ciascuna sezione monitorata riguardanti i principali indicatori rilevati, e qui di seguito esposti:

- Indicazione geografica della sezione monitorata
- Tipologia funzionale della strada
- Giorno, ora e data del conteggio con intervallo orario del rilievo
- Classificazione dei veicoli in base alla lunghezza (moto, auto, trasporto leggero e pesante)

- Numero totale di passaggi e ripartizione percentuale degli stessi per classe veicolare, in entrambe le direzioni di marcia
- Numero totale di passaggi e ripartizione percentuale degli stessi per classe veicolare, per fascia oraria, in entrambe le direzioni di marcia
- Grafico del flusso orario nelle due direzioni di marcia
- Velocità media rilevata in entrambe le direzioni
- V_{85} calcolata in entrambe le direzioni

3.4 Campagna di sezionamento

3.4.1 Introduzione

La geometrizzazione delle Infrastrutture consente di ricostruirne, da un punto di vista grafico, l'andamento planimetrico, con l'ausilio di cartografie ed informazioni raccolte in sito mediante rilievi. Si è reso indispensabile, a priori, tale operazione poiché le strade selezionate, non derivando da un preciso disegno, sono state oggetto di progressivi adeguamenti a carattere locale che hanno inficiato la regolarità geometrica della rete e creato una serie di singolarità.

La procedura di geometrizzazione ha permesso di definire l'esatta successione degli elementi componenti un tracciato stradale e di indicarne le principali caratteristiche quali tipologia, progressiva di inizio e fine, sviluppo, angolo di deviazione in gradi centesimali, ecc. Tale operazione ha richiesto l'ausilio di specifici software CAD come "Atlante 5 Premium".

3.4.2 Scelta delle sezioni da monitorare

Il piano di sezionamento realizzato nella suddetta fase di ricerca è stato incentrato sul monitoraggio del comportamento di guida dell'utente su tronchi geometrici stradali in rettilineo, curva circolare e lungo le transizioni rettilineo – curva-rettilineo dove l'utente avvia e conclude le fasi di decelerazione ed accelerazione per affrontare la curva.

Il posizionamento degli strumenti di rilievo è avvenuto a valle di una fase di pianificazione, frutto di approfondite analisi di studio in materia presenti nella letteratura scientifica internazionale e nazionale.

Le sezioni geometriche monitorate sono le seguenti:

- Sezione di centro – curva e di centro – rettifilo
- Sezione di inizio e fine – curva e di inizio e fine – rettifilo
- Sezioni in rettifilo ad ogni quarto dello sviluppo dell'elemento, in presenza di sviluppi dell'elemento maggiori di 500 m
- Sezioni lungo i rettifili di approccio e di allontanamento – curva, per l'analisi del comportamento di guida dell'utente lungo le transizioni; laddove le condizioni geometriche lo consentivano, le sezioni sono state fissate in numero pari a 3 distanti dalle sezioni di inizio e fine – curva 30÷50 m, 80÷120 m e 140÷220 m
- Sezioni in corrispondenza delle intersezioni a raso di maggiore significatività (escludendo, cioè, gli accessi a edifici isolati o zone industriali a scarsa urbanizzazione), in numero pari a 3 per ciascuna direzione, distanti dalla sezione di centro - intersezione 30÷50 m, 80÷120 m e 140÷220 m
- Sezioni in corrispondenza delle zone urbanizzate in cui è lecito ipotizzare un cambiamento del comportamento dell'utenza da un contesto extraurbano ad uno maggiormente antropizzato

Ogni sezione prescelta è stata riportata sulla cartografia, come mostrato nell'esempio di Figura 12, numerata in modo univoco con un indice progressivo ed associata alla corrispondente chilometrica, misurata rispetto ad un'origine convenzionale indicata come “sezione 0”.

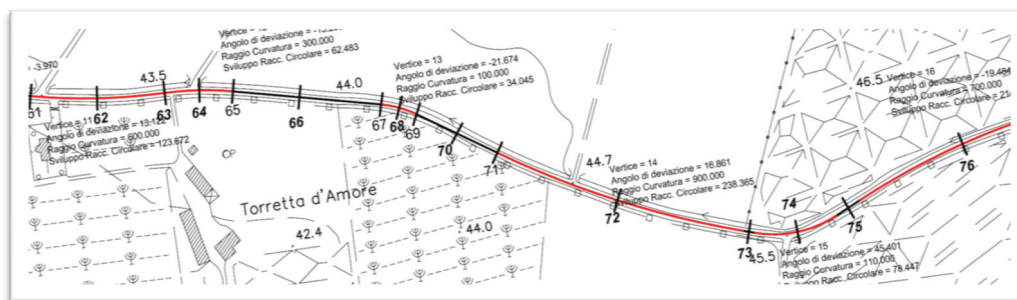


Figura 12_Stralcio Cartografico Piano di Sezionamento

Gli stralci cartografici allegati in Appendice A riportano il piano di sezionamento completo per ogni infrastruttura oggetto di studio.

Si precisa che le curve circolari sono state considerate “percepibili come tali”, ai fini del comportamento di guida in termini di velocità, solo quando erano percorse in un

tempo superiore ai 2,5 secondi [7]. Considerando la velocità di approccio – curva, con raggio sufficientemente ampio, di un veicolo proveniente da un rettilineo di notevole sviluppo pari, per esempio, a 90 km/h, lo sviluppo minimo della curva, per essere percepita come tale, deve essere di circa 60 m; valori inferiori dello sviluppo minimo richiesto, si sono ottenuti per velocità di percorrenza più basse. In presenza di curve di piccolo sviluppo si è evitato di pianificare rilevamenti in prossimità delle transizioni, e si è direttamente monitorata la sezione di mezzzeria.

Recenti studi sperimentali sulle transizioni, condotti in ambito nazionale ed internazionale [66] su strade extraurbane ad unica carreggiata, hanno evidenziato che la percentuale di rettilineo occupata dall'utente per decelerare e/o accelerare in ingresso e/o allontanamento curva non supera quasi mai 120 m a partire dalla sezione di inizio e fine – curva, rispettivamente.

Quest'aspetto ha assunto particolare rilievo nella fase di pianificazione della campagna di sezionamento dove le strade monitorate, prive di raccordi clotoidici orizzontali, preavvisavano una percentuale di transizione in rettilineo superiore a quella di strade dotate di spirali. La definizione di un tronco da monitorare sul rettilineo di approccio – curva ed allontanamento – curva esteso al massimo per 220 m aiuta a migliorare l'attendibilità dei risultati [48].

Il rilievo delle sezioni di approccio alle intersezioni è giustificato dall'azione di condizionamento esterno che gli incroci possono esercitare sui conducenti, determinando lungo un itinerario extraurbano, una riduzione delle velocità dei veicoli in avvicinamento allo stesso. In fase di progettazione solo le intersezioni a raso "isolate", cioè non localizzate in prossimità di accessi o di altre intersezioni, sono state monitorate, come suggerito da un'attenta analisi della letteratura scientifica [68].

CAPITOLO 4. COMPORTAMENTO DELL'UTENTE LUNGO I TRONCHI DI TRANSIZIONE

4.1 Introduzione

L'analisi del comportamento di guida degli utenti lungo le transizioni rettilineo – curva – rettilineo ha interessato il monitoraggio di sei infrastrutture stradali ricadenti nella Rete della Viabilità Ordinaria della Provincia di Salerno, ed in particolare nella Piana del Sele e nel Vallo di Diano. Il campione analizzato in questa prima fase di elaborazione – dati ha riguardato cinque strade provinciali (S.P. 30B, S.P. 52, S.P. 312 e S.P. 262) e due statali (S.S. 426 e S.S. 166).

Il database iniziale, assemblato con i dati delle otto strade extraurbane ad unica carreggiata illustrate nel corso del Capitolo 3, è stato scomposto in due successivi raggruppamenti: il primo riunisce le sei infrastrutture sopra elencate, impiegate per la messa a punto di procedure rivolte alla costruzione di un profilo continuo delle velocità operative, il secondo, invece, raccoglie le rimanenti due infrastrutture (S.S. 103 e S.P. 135) per la validazione dei risultati ottenuti.

Le peculiarità generali dei tracciati stradali impiegati nella prima fase di analisi sono mostrate in Tabella 8 dove per ciascuna strada monitorata sono indicati lo sviluppo geometrico ed il numero totale di sezioni osservate.

Tabella 8 Caratteristiche Infrastrutture esaminate

PIANA DEL SELE			VALLO DI DIANO		
Strade Monitorate	n. Sezioni Monitorate	Sviluppo [km]	Strade Monitorate	n. Sezioni Monitorate	Sviluppo [km]
S.P.30b	43	5,80	S.P.52	60	3,46
S.P.262	45	7,12	S.S.426	84	4,08
S.P.312	80	8,28	S.S.166	99	5,34

Le Tabelle 9 e 10 restituiscono una statistica sintetica delle principali caratteristiche geometriche e cinematiche dei rettilinei e degli elementi curvilinei circolari appartenenti al campione delle sei strade illustrate; in particolare, per ogni parametro è stato fornito il valore minimo, medio e massimo, nonché la deviazione standard della distribuzione dei valori ad esso associati.

Tabella 9 Statistica delle Caratteristiche dei rettifili esaminati

	Larghezza Carreggiata [m]	Raggio Curva che Precede [m]	CCRs Curva che Precede [gon/km]	Sviluppo Elemento [m]	CCR medio Tronco Omogeneo [gon/km]	V _{media} [km/h]	V ₈₅ [km/h]
Valore Medio	6,49	184	534,29	2225,92	44,26	57,18	75,28
Valore Massimo	12,56	450	2529,21	4699,00	159,28	78,43	102,65
Valore Minimo	4,80	25	141,47	65,37	9,60	40,29	50,25
Deviazione Standard	1,16	101	494,26	1516,78	46,21	8,09	9,94

Tabella 10 Statistica delle Caratteristiche delle Curve Circolari esaminate

	Larghezza Carreggiata [m]	Raggio [m]	CCR medio [gon/km]	CCRs [gon/km]	Sviluppo Curva [m]	Raggio Curva che precede [m]	Lunghezza Rettifilo che precede [m]	V _{media} [km/h]	V ₈₅ [km/h]
Valore Medio	6,49	170	115	593	69	1514	353	47	60
Valore Massimo	12,56	450	236	2529	218	10000	4175	72	92
Valore Minimo	4,80	25	10	141	22	20	40	25	31
Deviazione Standard	1,16	106	81	506	38	3240	684	12	15

Gli strumenti di rilievo, come descritto minuziosamente nel corso del precedente Capitolo per l'acquisizione delle misure di velocità lungo le transizioni, sono stati posizionati in corrispondenza di specifiche sezioni geometriche: sezione d'inizio (*PC* _ point of curvature), centro (*MC* _ middle curve) e fine - curva (*PT* _ point of tangent), e sui rettifili che precedono e seguono gli stessi elementi curvilinei circolari a distanza di 30 ÷ 50 m, 80 ÷ 120 m e 140 ÷ 200 m dalle sezioni PC e PT, come indicato in Figura 13.

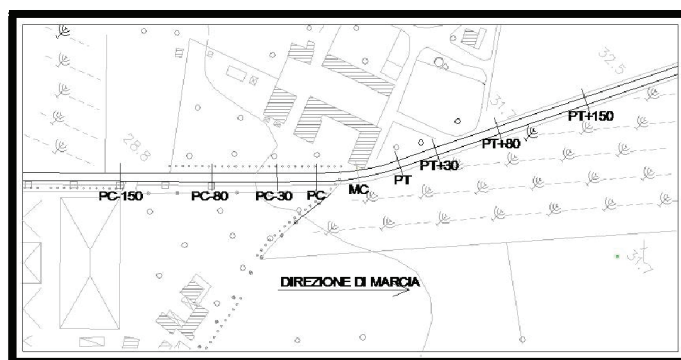


Figura 13_Piano Tipo di Sezionamento lungo le Transizioni

4.2 Analisi dei dati

L'identificazione dei tronchi di transizione per ciascun elemento curvilineo circolare ha richiesto, preliminarmente, il tracciamento per senso di marcia dei valori registrati di V_{85} , al variare dell'ascissa curvilinea, sull'intero sviluppo del tracciato geometrico stradale esaminato, come illustrato in Figura 14.

I diagrammi riportano in ascissa su tre rispettivi livelli un numero assoluto identificativo della sezione monitorata, le distanze parziali, in metri, delle sezioni da un'origine di riferimento, e la tipologia dell'elemento geometrico indagato, mentre in ordinata si ritrova, al variare dell'ascissa curvilinea, il rispettivo valore dell'85° percentile della distribuzione delle velocità rilevate.

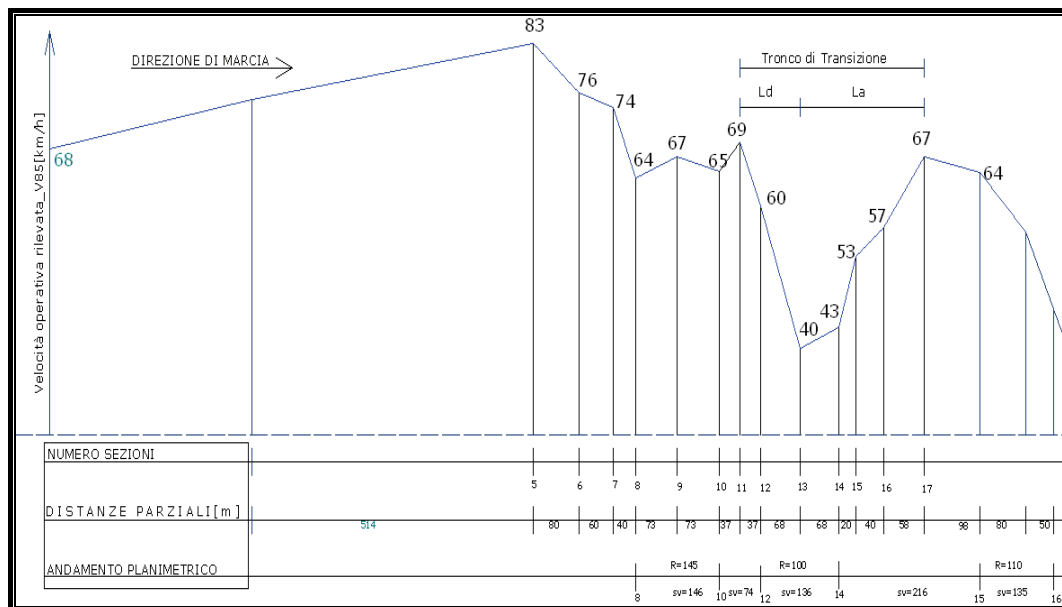


Figura 14_ Stralcio del profilo delle velocità operative sulla S.P.312 ed esempio di individuazione del tronco di transizione per la curva con raggio di 100 metri

Tali diagrammi hanno favorito l'individuazione delle reali zone di transizione, impegnate dall'utente per la manovra di decelerazione in ingresso - curva e/o accelerazione per l'allontanamento dall'elemento curvilineo circolare.

I differenti profili di velocità operativa, acquisiti lungo le transizioni, possono essere sintetizzati in sei possibili tipologie, come illustrano le Figure dalla 15 alla 19.

I diagrammi riportano in ascissa la distanza, in metri, della sezione monitorata lungo le transizioni dalla sezione di centro - curva (MC), definita positiva nella fase di ingresso - curva e negativa nella fase di allontanamento, in ordinata, invece, si ritrova il valore rilevato della velocità operativa (V_{85}), in km/h.

È indicato con linea continua il tratto di transizione percorso in decelerazione (L_d) e con linea tratto e punto la zona di accelerazione (L_a), per ciascun elemento curvilineo circolare. Su ciascun profilo è stata posta una freccia che descrive la direzione di marcia della corrente veicolare.

Nel primo caso (Figura 15) il rettilifo che precede e segue la curva, con lunghezza di 250 m e 280 m, e lo stesso elemento curvilineo circolare, esteso per 78m, consentono agli utenti di raggiungere una velocità di marcia costante sull'intero sviluppo della curva e su parte degli elementi rettilinei limitrofi.

Le azioni di decelerazione ed accelerazione coinvolgono, esclusivamente, il rettilifo di approccio ed allontanamento – curva.

In diagramma è mostrata la massima distanza di decelerazione sul rettilifo che precede la curva, registrata in fase sperimentale sulle sei strade monitorate, pari a 200m a partire dalla sezione PC.

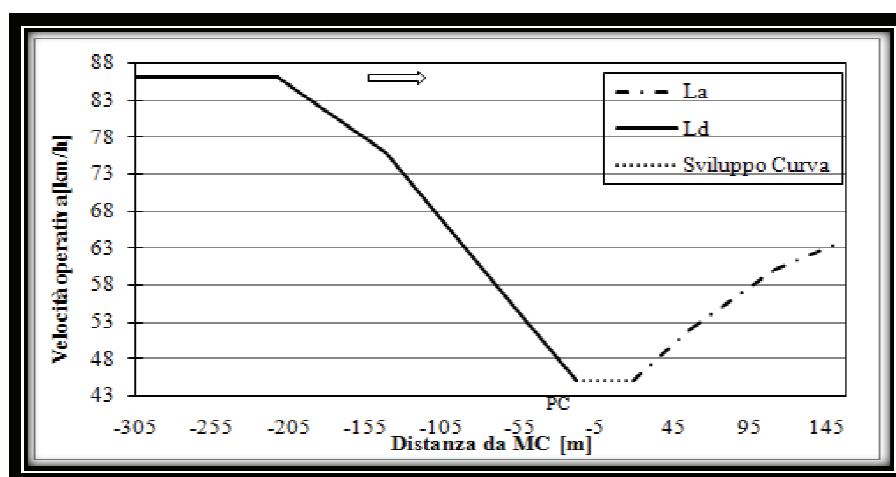


Figura 15_Curva con Raggio pari a 60 m sulla S.S.426

Nel secondo caso (Figura 16) l'utente percorre la curva a velocità variabile.

Lo sviluppo dell'elemento curvilineo circolare, pari a 120 m, associato ad un raggio non elevato, pari a 100m, impediscono all'utente di adottare una marcia costante, provenendo da velocità sostenute sul rettilifo che precede con sviluppo pari a 180m.

La velocità in curva diminuisce, in particolare, nella prima parte fino alla sezione MC (centro – curva) ed aumenta nella seconda parte.

Le azioni di decelerazione ed accelerazione coinvolgono, oltre all'elemento curvilineo circolare, parte dei rettilifi attigui, esaurendosi a breve distanza dalle sezioni PC (sezione d'inizio – curva) e PT (sezione di fine – curva) con il raggiungimento su di essi di una velocità di marcia, pressoché, costante.

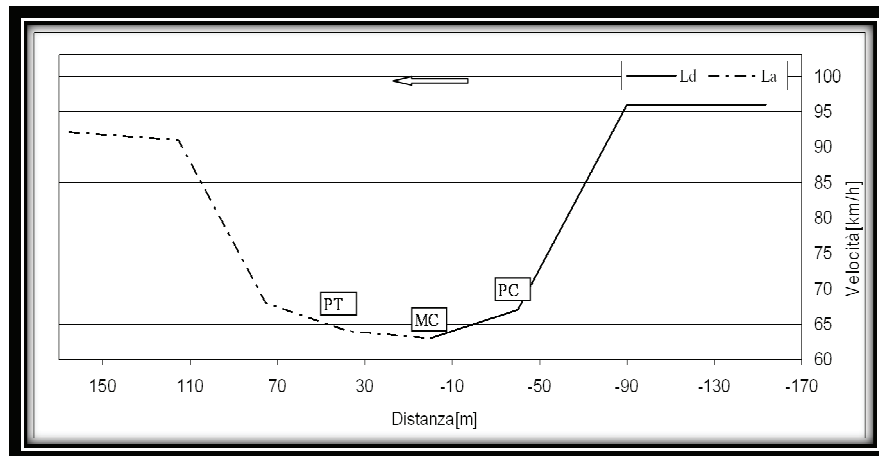


Figura 16_Curva con Raggio pari a 100 m sulla S.P.262

Nel terzo caso (Figura 17) la curva è percorsa interamente in decelerazione.

Tale manovra deriva dalla limitata estensione dell'elemento curvilineo circolare, pari a 50 m, dal valore non elevato del suo raggio, pari a 100 m, e dalla ridotta estensione del rettilo di approccio – curva. Quest'ultimo, esteso per 60 m, è percorso con velocità di marcia, pressoché, costante, per la presenza di una curva, che lo precede, di notevole sviluppo e raggio superiore a 500 m.

La fase di accelerazione coinvolge il solo rettilo di allontanamento – curva con lunghezza pari a 148 m. L'utente non attinge su quest'ultimo una velocità costante a causa del ridotto sviluppo dell'elemento curvilineo, che lo precede e segue, inferiore a 200 m con raggio minore di 150 m.

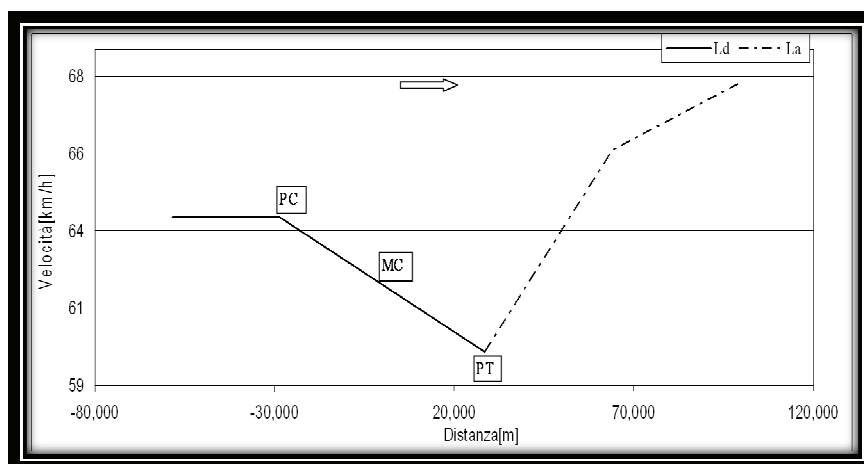


Figura 17_Curva con Raggio pari a 100 m sulla S.P.52

Nel quarto caso (Figura 18) il conducente percorre l'elemento curvilineo circolare completamente in accelerazione.

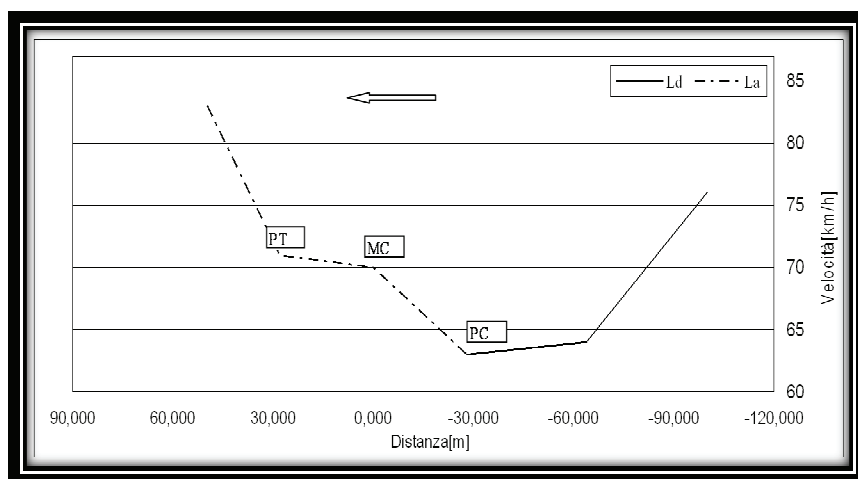


Figura 18_Curva con Raggio pari a 250 m sulla S.S.426

Tale manovra è condizionata dalla ridotta estensione sia del rettilo di approccio – curva pari a 78 m, sul quale non è attinta dall'utente una velocità di marcia costante, sia dell'elemento curvilineo circolare pari a 60m con un raggio non modesto. La manovra è incoraggiata da una buona visibilità che fa percepire al di là del rettilo di allontanamento – curva, esteso per 90 m, una curva di raggio superiore ai 500 m dove l'utente tende a non alterare la propria condotta rispetto al rettilo che precede.

La fase di accelerazione si ripartisce, pertanto, tra curva e rettilo di allontanamento, mentre quella di decelerazione si esaurisce sul rettilo di approccio – curva.

Nel quinto caso (Figura 19) la velocità cresce nella prima parte della curva (da PC a MC) e decresce nella seconda (da MC a PT).

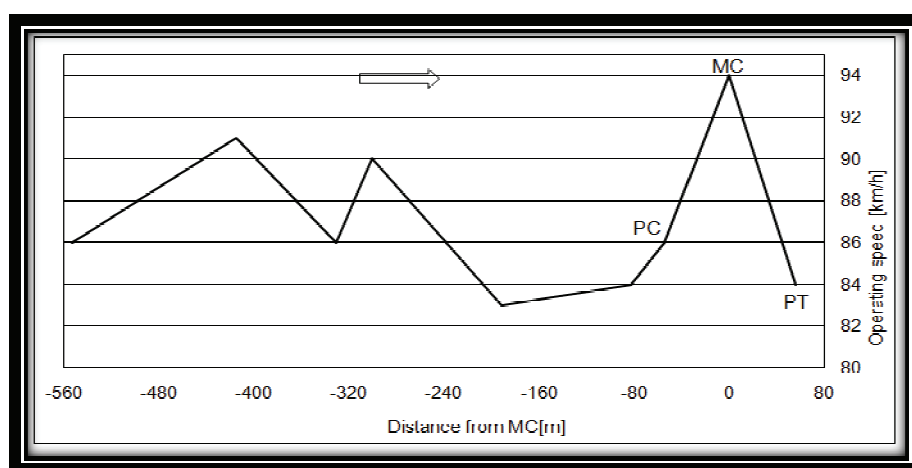
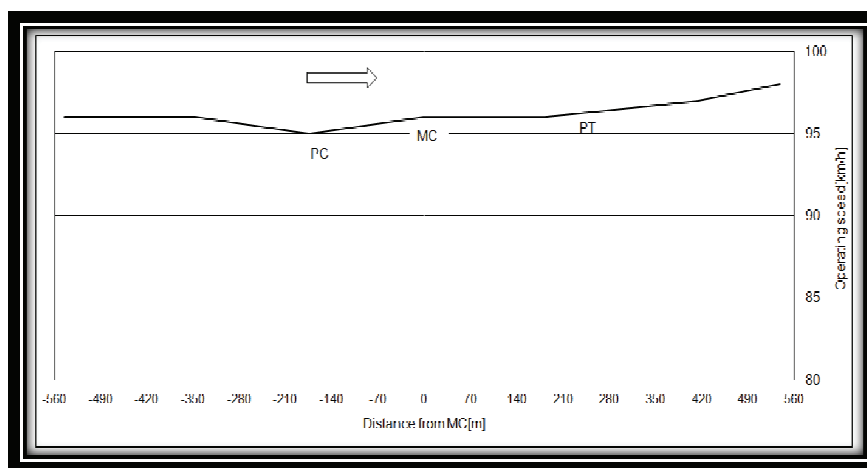


Figura 19_Curva con Raggio pari a 190 m sulla S.S.426

I siti, in cui è stato rilevato un valore della velocità sui rettili di approccio – curva inferiore a quello dell'elemento curvilineo circolare attiguo, non sono stati presi in

considerazione, apparendo la curva, palesemente, non influente sulle condizioni di marcia dell'utente durante la manovra di ingresso. Tale circostanza è attribuibile ad anomalie in sito o di rilievo non rinvenibili.

Altre “anomalie” sono state riscontrate in presenza di elementi curvilinei circolari con raggio superiore a 500 metri come mostrato nella seguente Figura.



Gli utenti percorrono, in tali condizioni geometriche, la curva con velocità di marcia pressoché inalterata rispetto ai valori registrati sul rettifilo di approccio. Tali elementi non hanno impatto sulle variazioni di marcia dell'utente nel passaggio rettifilo – curva – rettifilo e sono stati, pertanto, esclusi dal database delle curve circolari ed inglobati in quello dei rettifili [5] [44].

La base campionaria è costituita in definitiva da 36 siti significativi per la stima dei tassi di decelerazione e 34 siti per la stima di quelli di accelerazione. I differenti profili di velocità operativa e l'identificazione, per ciascun elemento curvilineo circolare, delle zone di transizione hanno, in particolare, favorito la ripartizione del database in 80 rettifili, 40 curve, e 70 transizioni rettifilo – curva – rettifilo.

4.3 Stima dei Tassi di Decelerazione ed Accelerazione

4.3.1 Prima Procedura d'analisi

I tassi di decelerazione ed accelerazione sono stati stimati nell'ipotesi di moto uniforme lungo i tronchi di transizione al fine di sviluppare un semplice ed efficace modello per la costruzione di un profilo continuo delle velocità operative.

La procedura adottata è ampiamente trattata ed utilizzata in letteratura [10]

[63], e si basa sulla costruzione, in primo luogo, del profilo delle velocità operative rilevate, per senso di marcia, e sulla differenza, a posteriori, di due valori di V_{85} in corrispondenza di due specifiche sezioni lungo le transizioni.

I tassi $d_{mV_{85}}$ e $a_{mV_{85}}$ sono stati determinati come segue:

- $d_{mV_{85}}$ = *tasso di decelerazione*, in ms^{-2} , valutato su una distanza di transizione L_d , in metri, definita tronco di transizione percorso in decelerazione, associato al generico elemento curvilineo circolare. Il tasso è stimato con la (30), attraverso la determinazione di due valori di V_{85} , in km/h. Il primo (V_1) è rilevato sul rettilineo di approccio – curva, in corrispondenza di una sezione geometrica distante al più 200 m da quella d’inizio – curva, dove si registra il massimo valore di V_{85} . Tale sezione, in particolare, può configurarsi, attraverso l’analisi del profilo globale delle velocità operative rilevate, anche con quella d’inizio – curva, se l’elemento circolare è percorso tutto in decelerazione. Il secondo (V_2) è rilevato sull’elemento curvilineo circolare dove si registra il minimo valore di V_{85}

$$d_{mV_{85}} = \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2 \cdot L_d} \cdot (3,6^{-2}) \quad (30)$$

- $a_{mV_{85}}$ = *tasso di accelerazione*, in ms^{-2} , valutato su una distanza di transizione L_a , in metri, definita tronco di transizione percorso in accelerazione, associato al generico elemento curvilineo circolare. Il tasso è stimato con la (31), attraverso la determinazione di due valori di V_{85} , in km/h. Il primo (V_1) è rilevato sul rettilineo di allontanamento – curva, in corrispondenza di una sezione geometrica distante al più 200 m da quella di fine – curva, dove si registra il massimo valore di V_{85} . Tale sezione, in particolare, è assimilabile, attraverso l’analisi del profilo globale delle velocità operative rilevate, anche con quella di fine – curva, se l’elemento circolare è percorso tutto in accelerazione. Il secondo (V_2) è rilevato sull’elemento curvilineo circolare dove si registra il minimo valore di V_{85}

$$a_{mV_{85}} = \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2 \cdot L_a} \cdot (3,6^{-2}) \quad (31)$$

I parametri valutati per ciascun sito, al fine di stimare i relativi tassi $d_{mV_{85}}$ e $a_{mV_{85}}$, sono riportati in Tabella 11 e di seguito, sinteticamente, illustrati:

- L_d = *Lunghezza del tronco di transizione, percorso in decelerazione, somma di due*

aliquote ($L_d = t_d + c_d$), in metri

- $t_d =$ *Parte del tronco di transizione L_d sul rettifilo di approccio – curva, in metri e in percentuale*
- $c_d =$ *Parte del tronco di transizione L_d sull'elemento curvilineo – circolare, in metri e in percentuale*
- $L_a =$ *Lunghezza del tronco di transizione, percorso in accelerazione, somma di due aliquote ($L_a = t_a + c_a$), in metri*
- $t_a =$ *Parte del tronco di transizione L_a sul rettifilo di allontanamento curva, in metri e in percentuale*
- $c_a =$ *Parte del tronco di transizione L_a sull'elemento curvilineo – circolare, in metri e in percentuale*

Tabella 11 Tassi di decelerazione ed accelerazione e lunghezza dei tronchi di transizione

Strada	Sito	Raggio C. [m]	Svil. Curva [m]	CCRs [gon/km]	CCR _m [gon/km]	L _{rp} [m]	d [ms ⁻²]	dir	a [ms ⁻²]	L _d [m]	L _a [m]	t _d [m]	c _d [m]	t _a [m]	c _a [m]	t _d [%]	c _d [%]	t _a [%]	c _a [%]
S.P.262	1	100	74,43	640,27	9,916	4787	0,79	0	0,31	115,5	191,0	115,50	0,00	113,5	77,5	100	0	59	41
S.P.262	2	100	74,43	640,27	9,916	1914	-	1	1,05	-	165,5	-	-	128	37,5	-	-	77	23
S.P.30b	3	280	57,36	227,36	9,601	309	0,29	0	-	122,0	-	0,00	122	-	-	0	100	-	-
S.P.30b	4	280	57,36	227,36	9,601	214	0,27	1	0,60	75,0	172,0	75	0	50	122	100	0	29	71
S.P.30b	5	200	47,94	318,31	9,601	360	0,82	1	-	206,0	-	131	75	-	-	64	36	-	-
S.P.312	6	145	145	439,05	47,156	1307	0,32	0	0,57	325,0	36,5	180	145	36,5	0	55	45	100	0
S.P.312	7	145	145	439,05	47,156	73	0,39	1	0,46	72,5	252,5	0	72,5	180	72,5	0	100	71	29
S.P.312	8	200	64	318,31	47,156	2907	0,32	0	-	173,0	-	173	0	-	-	100	0	-	-
S.P.312	9	200	64	318,31	47,156	1086	0,46	1	0,62	32,0	32,0	0	32	0	32	0	100	0	100
S.P.312	10	50	43	1273,24	47,156	621	-	0	0,33	-	411,5	-	-	390	21,5	-	-	95	5
S.P.312	11	50	43	1273,24	47,156	491	0,31	1	0,40	433,0	196,5	390	43	196,5	0	90	10	100	0
S.P.312	12	300	63	212,21	47,156	138	1,66	1	-	63,0	-	0	63	-	-	0	100	-	-
S.P.312	13	100	34	636,62	47,156	138	0,55	0	0,42	86,0	99,0	69	17	82	17	80	20	83	17
S.P.312	14	100	34	636,62	47,156	82	0,38	1	0,45	58,0	155,0	41	17	17	138	71	29	11	89
S.P.312	15	110	78	578,75	47,156	11	1,42	0	0,93	45,0	52,5	0	45	0	52,5	0	100	0	100
S.P.312	16	110	78	578,75	47,156	26	1,04	1	0,58	52,5	45,0	0	52,5	0	45	0	100	0	100
S.P.52	17	100	57	633,54	159,277	166	0,42	0	0,71	71,0	57,0	71	0	0	57	100	0	0	100
S.P.52	18	100	57	633,54	159,277	71	0,22	1	0,56	87,0	71,0	30	57	71	0	34	66	100	0
S.S.426	19	90	33	707,36	63,288	23	0,68	0	1,18	22,8	77,3	22,8	0	44,2	33,1	100	0	57	43
S.S.426	20	90	33	707,36	63,288	183	0,47	1	-	88,6	-	44,2	44,4	-	-	50	50	-	-
S.S.426	21	60	73	1061,03	63,288	183	0,50	0	0,53	175,5	286,6	138,9	36,6	250	36,6	79	21	87	13
S.S.426	22	60	73	1061,03	63,288	502	0,72	1	0,46	286,6	175,5	250	36,6	175,5	0	87	13	100	0
S.S.426	23	250	80	254,65	63,288	166	1,88	0	0,58	67,8	162,2	27,8	40,0	122	40	41	59	75	25
S.S.426	24	250	80	254,65	63,288	724	-	1	1,26	-	84,0	-	-	83,98	0	-	-	100	0
S.S.426	25	400	108	159,15	63,288	724	0,42	0	0,27	409,2	290,8	301	108,2	290,8	0	74	26	100	0
S.S.426	26	400	108	159,15	63,288	428	-	1	0,28	-	355	-	-	301	54	-	-	85	15
S.S.426	27	240	119	265,25	63,288	428	0,44	0	1,35	199,7	59,7	140	59,7	0	59,7	70	30	0	100
S.S.426	28	240	119	265,25	63,288	283	1,24	1	0,27	97	303,0	37,6	59,4	243	60	39	61	80	20
S.S.426	29	150	42	424,41	63,288	283	0,38	0	0,62	81,3	103,0	0	81,3	103	0	0	100	100	0
S.S.426	30	150	42	424,41	63,288	121	0,77	1	1,68	40,0	41,6	40	0	0	41,6	100	0	0	100
S.S.426	31	250	56	254,65	235,793	43	0,82	0	0,79	70,2	28,0	42,2	28	0	28	60	40	0	100
S.S.426	32	250	56	254,65	235,793	72	0,97	1	1,45	71,8	77,7	72	0	21,7	56	100	0	28	72
S.S.426	33	100	37	636,62	235,793	101	1,89	1	-	18,7	-	0	18,7	-	-	0	100	-	-
S.S.426	34	100	33	636,62	235,793	46	1,03	1	0,71	63,4	117,0	63,4	0	101	16	100	0	86	14
S.S.426	35	100	33	636,62	235,793	101	0,61	0	0,71	117,9	16,7	117,9	0	0	16,7	100	0	0	100
S.S.426	36	100	58	636,62	235,793	35	0,75	1	1,17	45,3	28,9	45	0	0	28,9	100	0	0	100
S.S.426	37	100	58	636,62	235,793	46	0,26	0	0,46	46,7	92,0	47	0	34	58	100	0	37	63
S.S.426	38	180	91	353,68	235,793	55	0,39	1	0,29	45,8	45,8	0	45,8	0	45,8	0	100	0	100
S.S.426	39	180	91	353,68	235,793	74	0,65	0	0,46	128,8	26,7	128,8	0	0	26,7	100	0	0	100
S.S.426	40	70	55	909,45	235,793	55	0,79	0	-	55,2	-	28,2	27	-	-	51	49	-	-
S.S.426	41	70	55	909,45	235,793	13	-	1	0,77	-	110,0	-	-	82	28	-	-	75	25
Valore medio osservato										Valore med.osservato[%]									
0,70										60									
0,68										40									
115										51									
130										49									

La definizione di un valore medio del tasso di decelerazione ed accelerazione è stata preceduta da una verifica statistica delle misure mediante carta di controllo [69].

Tale strumento consente di rilevare, attraverso la valutazione della deviazione standard σ e della media μ campionaria, la presenza di eventuali anomalie nella distribuzione dei tassi che, generando un aumento della dispersione delle singole misure intorno alla media, richiedono un'analisi puntuale.

Le carte di controllo statistico dei tassi di decelerazione ed accelerazione, riportate nelle Figure 20 e 21, rivelano che i fenomeni sono sotto controllo ricadendo i valori nel range $\mu \pm 3\sigma$.

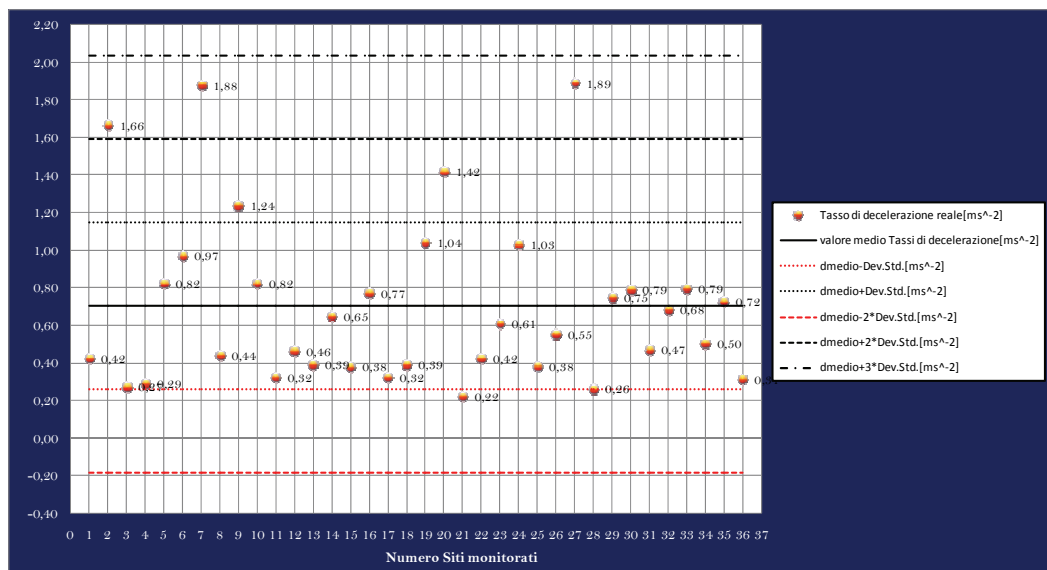


Figura 20_Carta di Controllo Statistico dei Tassi di Decelerazione

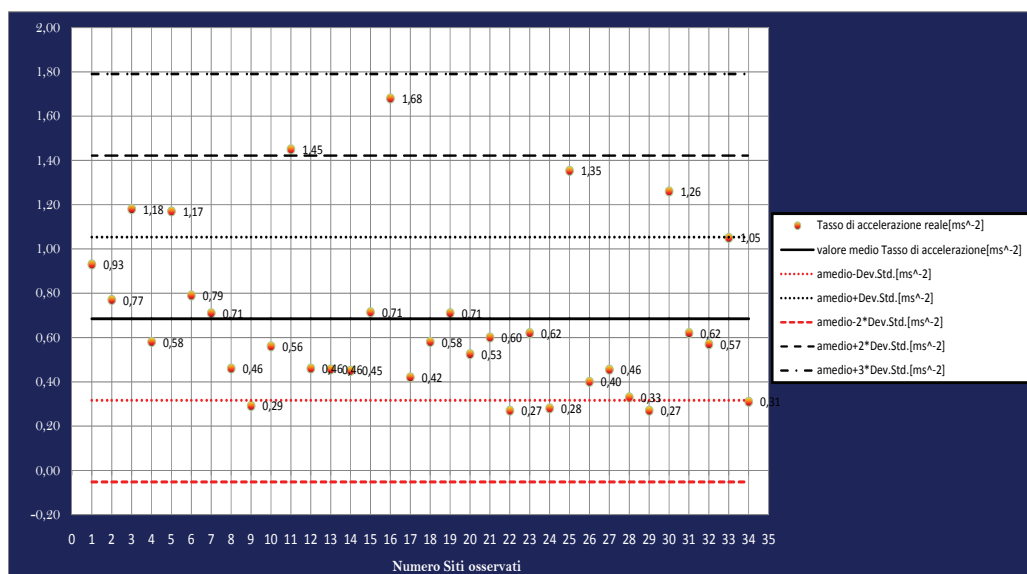


Figura 21_Carta di Controllo Statistico dei Tassi di Accelerazione

Il diagramma in Figura 20 non evidenzia anomalie nella distribuzione dei tassi di decelerazione; il totale delle misure rientra nella fascia $[\mu - 2\sigma; \mu + 3\sigma] = [-0,185 \text{ ms}^{-2}; 2,035 \text{ ms}^{-2}]$. In particolare, è possibile constatare che più della metà del campione esaminato, pari all'81% del totale dei tassi di decelerazione valutati, ricade nel range $[\mu - \sigma; \mu + \sigma] = [0,26 \text{ ms}^{-2}; 1,15 \text{ ms}^{-2}]$, dove il massimo scostamento registrato dal valore medio è pari a $1,04 \text{ ms}^{-2} - 0,70 \text{ ms}^{-2} = 0,34 \text{ ms}^{-2}$, ritenuto più che tollerabile.

La Figura 21 indica, egualmente, una regolare distribuzione dei tassi di accelerazione intorno al valore medio, con la totalità dei valori stimati appartenenti alla fascia $[\mu - 2\sigma; \mu + 3\sigma] = [-0,05 \text{ ms}^{-2}; 1,79 \text{ ms}^{-2}]$. In particolare, è possibile osservare come più della metà del campione esaminato, pari al 71%, ricade nel range $[\mu - \sigma; \mu + \sigma] = [0,32 \text{ ms}^{-2}; 1,05 \text{ ms}^{-2}]$, dove il massimo scostamento registrato dal valore medio è pari a $1,05 \text{ ms}^{-2} - 0,68 \text{ ms}^{-2} = 0,37 \text{ ms}^{-2}$, considerato più che ammissibile.

Le Carte di Controllo Statistico, non rilevando anomalie nella distribuzione delle misure, hanno consentito la determinazione di un valore medio dei tassi di decelerazione ed accelerazione riportati in Tabella 11.

Il valore medio del tasso di decelerazione, misurato sulle sei strade monitorate, è risultato pari a $0,70 \text{ ms}^{-2}$, mentre quello di accelerazioni pari a $0,68 \text{ ms}^{-2}$; in Tabella 11 è mostrato, altresì, il valore medio delle distanze L_d (tronco percorso in decelerazione nella manovra di immissione in curva) ed L_a (tronco percorso in accelerazione nella manovra di allontanamento dall'elemento curvilineo circolare).

Lo sviluppo medio di L_d è risultato di 115 metri per le strade esaminate, ripartendosi mediamente per il 60% sul rettilo di approccio - curva, a partire dalla sezione PC, e per il restante 40% sulla medesima curva. Tale lunghezza conferma i risultati di Fitzpatrick et al. [10], che rilevarono l'avvio della fase di decelerazione sul rettilo di approccio - curva a distanze non superiori a 200m dalla sezione di inizio - curva.

Lo sviluppo medio di L_a si è rivelato pari a 130 metri, ripartendosi mediamente per il 51% sul rettilo di allontanamento - curva, a partire dalla sezione PT, e per il restante 49% sulla medesima curva circolare.

4.3.1.1 Analisi Statistica

T-tests sono stati effettuati per verificare se il valore medio stimato dei tassi, sul campione delle sei strade extraurbane monitorate, fosse significativamente differente dalle costanti suggerite da alcuni gruppi di ricercatori [62] [10] e da alcuni Standards

internazionali e nazionali [15] [7].

L'analisi è stata condotta con l'ausilio del software "Statistica 7", distribuito dalla "StatSoft", con l'imput di un insieme di dati sperimentali, esibiti di volta in volta nel layout finale del Programma con la relativa significatività statistica.

I parametri, assegnati dal Programma a ciascuna variabile, sono i seguenti:

- Mean = *Valore medio della base campionaria* (\bar{x})
- Std. Dev. = *Deviazione Standard della base campionaria* (s)
- Var. = *Varianza della base campionaria* (s²)
- N. = *Dimensione della base campionaria* (n)
- Std. Error = *Deviazione standard della media della popolazione, stimata con la* (32)

$$Std.Error = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (32)$$

- Reference Constant = *Costante di riferimento* (c) per l'elaborazione del t-test
- t-value = *Risultato del t-test* secondo l'espressione (33)

$$t = \frac{\bar{x} - c}{s/\sqrt{n}} \quad (33)$$

- df = *Gradi di libertà (degrees of freedom) della base campionaria*, nel caso in esame pari ad $n-1$
- p - level = *livello di significatività α del test* per il quale si rifiuterebbe l'ipotesi nulla (H_0) [69]. Se il p - value è minore del livello di significatività α , generalmente fissato al 5% od anche all'1%, l'ipotesi nulla è rifiutata; più basso è il valore p , più rilevante è il risultato. Nel caso l'ipotesi nulla sia rifiutata, si accetterà l'ipotesi alternativa, indicata con H_1 . Se si rifiuta un'ipotesi nulla, in particolare, quando nella realtà è vera, si commette un *errore di prima specie*; accettando, invece, un'ipotesi nulla falsa si commette un *errore di seconda specie*. Con i dati campionari si esegue il test e si valuta se il valore restituito, nel caso in esame pari a t , cade nella regione di rifiuto (l'ipotesi nulla è rigettata quando $p < \alpha$) o nella regione di accettazione (l'ipotesi nulla non è rigettata quando $p > \alpha$).

Per verificare se il valore medio stimato dei tassi fosse stato statisticamente differente da quello inizialmente proposto da Lamm et al. [62], pari a 0,85ms⁻², è stato svolto un t-test.

L'ipotesi nulla H_0 del test coincide con l'affermare che il valore medio stimato del tasso di decelerazione (d_{mv85}) ed accelerazione (a_{mv85}) non è statisticamente differente da $0,85\text{ms}^{-2}$.

I risultati del t-test sono mostrati nel primo summary delle Tabelle 12 e 13.

La Tabella 12 indica che il valore medio stimato di d_{mv85} , pari a $0,70\text{ ms}^{-2}$, non è statisticamente differente da $0,85\text{ ms}^{-2}$ per un livello di significatività α pari al 5%, contrariamente a quanto ritrovato da Fitzpatrick et al. [10].

La Tabella 13 mostra, invece, che il valore medio stimato di a_{mv85} , pari a $0,68\text{ ms}^{-2}$, è statisticamente differente da $0,85\text{ ms}^{-2}$ per un livello di significatività α pari al 5%.

Tabella 12 t-tests Tassi di Decelerazione

Variable	Test of means against reference constant							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
d [ms^{-2}]	0,703330	0,443920	36	0,073987	0,850000	-1,98239	35	0,055330

Variable	Test of means against reference constant							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
d [ms^{-2}]	0,703330	0,443920	36	0,073987	0,800000	-1,30659	35	0,199873

Tabella 13 t-tests Tassi di Accelerazione

Variable	Test of means against reference constant							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
a [ms^{-2}]	0,684529	0,368524	34	0,063201	0,850000	-2,61815	33	0,013245

Variable	Test of means against reference constant							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
a [ms^{-2}]	0,684529	0,368524	34	0,063201	0,800000	-1,82703	33	0,076752

In seguito, un secondo t-test è stato sviluppato per verificare se il valore medio stimato dei tassi fosse stato statisticamente differente da $0,80\text{ ms}^{-2}$, suggerito dagli Standards di Progettazione geometrica italiana [7] e svizzera [15] per la costruzione del diagramma delle velocità di progetto

I risultati, mostrati nel secondo summary delle Tabelle 12 e 13, indicano che sia il valore medio del tasso di decelerazione, pari a $0,70\text{ ms}^{-2}$, che il valor medio del tasso di accelerazione, pari a $0,68\text{ ms}^{-2}$, non sono statisticamente differenti da $0,80\text{ ms}^{-2}$, per un livello di significatività α pari al 5%, contrariamente a quanto ritrovato da B. Crisman et al. [64].

In conclusione, l'utilizzo di un valore medio del tasso di decelerazione pari a $0,85\text{ ms}^{-2}$ o $0,80\text{ ms}^{-2}$, per la costruzione di un profilo continuo delle velocità operative, interpreta discretamente bene, sulle strade monitorate, la reale riduzione di velocità dei

guidatori nella fase di approccio – curva. La definizione dello sviluppo del tronco di transizione in decelerazione, associato a ciascun elemento curvilineo circolare, restituisce, di conseguenza, risultati paragonabili sia utilizzando un tasso suggerito dalle ricerche internazionali o standards di progettazione, pari a $0,85 \text{ ms}^{-2}$ e $0,80 \text{ ms}^{-2}$ rispettivamente, sia sperimentalmente misurato sulle strade monitorate pari a $0,70 \text{ ms}^{-2}$.

L'impiego di un tasso di accelerazione pari a $0,85 \text{ ms}^{-2}$ non interpreta, invece, correttamente la reale variazione di velocità monitorata sulle sei strade extraurbane a singola carreggiata durante la fase di allontanamento – curva. Il valore costante suggerito dagli Standard italiani, pari a $0,80 \text{ ms}^{-2}$, non presentandosi al contrario statisticamente differente dal valore misurato in sito pari a $0,68 \text{ ms}^{-2}$, restituisce, approssimativamente, una dimensione analoga delle distanze di transizione L_d se applicato in luogo di quello sperimentale registrato.

4.3.2 Seconda Procedura d'Analisi:

Presenza di Anomalie nella Stima dei Tassi

4.3.2.1 Introduzione

La Tabella 11 mostrata nel corso del Paragrafo 4.3.1 ha presentato lo sviluppo medio, valutato in via sperimentale su sei strade extraurbane monitorate, del tronco L_d , percorso in decelerazione, pari a 115 m che si ripartisce mediamente nel 60% sul rettilifo di approccio – curva e nel restante 40% sulla medesima curva. In realtà, quando il tracciato stradale presenta lunghezze dei rettifili di approccio – curva inferiore a 69 m (60% di 115 m) e sviluppo delle curve circolari inferiore a 47 m (40% di 115 m), non è più pensabile adoperare un valore medio del tasso di decelerazione pari a $0,70 \text{ ms}^{-2}$, né una ripartizione percentuale del 60% e 40% del tronco di transizione L_d tra rettilifo e curva. Difficoltà analoghe si riscontrano nell'analisi del comportamento di guida dell'utente lungo i tronchi di transizione L_d ; infatti, dalla Tabella 11 si osserva che lo sviluppo medio del tronco è pari a 130 m, ripartendosi nel 51% sul rettilifo di allontanamento – curva e nel restante 49% sulla medesima curva circolare. In realtà, quando il tracciato geometrico propone rettifili di allontanamento – curva con sviluppo inferiore a 66 m (51% di 130 m) e curve circolari estese meno di 64 m (49% di 130 m), non è più concepibile adottare un valore medio del tasso di accelerazione pari a $0,68 \text{ ms}^{-2}$, né una ripartizione percentuale del 51% e 49% del tronco di transizione L_d tra rettilifo e curva.

4.3.2.2 Stima dei Tassi di Decelerazione ed Accelerazione

Una nuova stima del valore medio del *tasso di decelerazione* è stata condotta, per i motivi sopra esposti, suddividendo la base campionaria iniziale, composta da 36 siti, in due gruppi: il primo formato da 23 siti, con sviluppo dei rettifili di approccio – curva superiore a 83 m e lunghezza delle curve circolari superiore a 56 m, il secondo composto, invece, da 13 siti, con sviluppo dei rettifili di approccio - curva inferiore a 83 m e curve circolari con sviluppo inferiore a 56 m. Tale ripartizione è stata frutto di una serie ciclica di iterazioni, arrestatesi quando la ripartizione media percentuale tra rettilo e curva del tronco L_d era realmente applicabile ai vari siti, senza scontrarsi con i limiti geometrici degli elementi componenti il tracciato.

L'elaborazione dei dati, appartenenti al primo gruppo dei tassi di decelerazione, ha fornito i risultati mostrati in Tabella 14 dove il tronco di transizione, con sviluppo medio pari a 145 m, si ripartisce nel 61% sul rettilo di approccio – curva e nel restante 39% sulla medesima curva. Il valore medio del tasso di decelerazione, per i dati appartenenti al gruppo, è pari a $0,69 \text{ ms}^{-2}$.

Tabella 14_ Stima Tassi di Decelerazione (I Gruppo)

Valore medio osservato			
$d \text{ [ms}^{-2}\text{]}$	$L_d \text{ [m]}$	$t_d \text{ [%]}$	$c_d \text{ [%]}$
0,69	145	61	39

La definizione di un valore medio del tasso di decelerazione, è stata preceduta da un controllo statistico dei 23 siti utili, come mostrato in Figura 22.

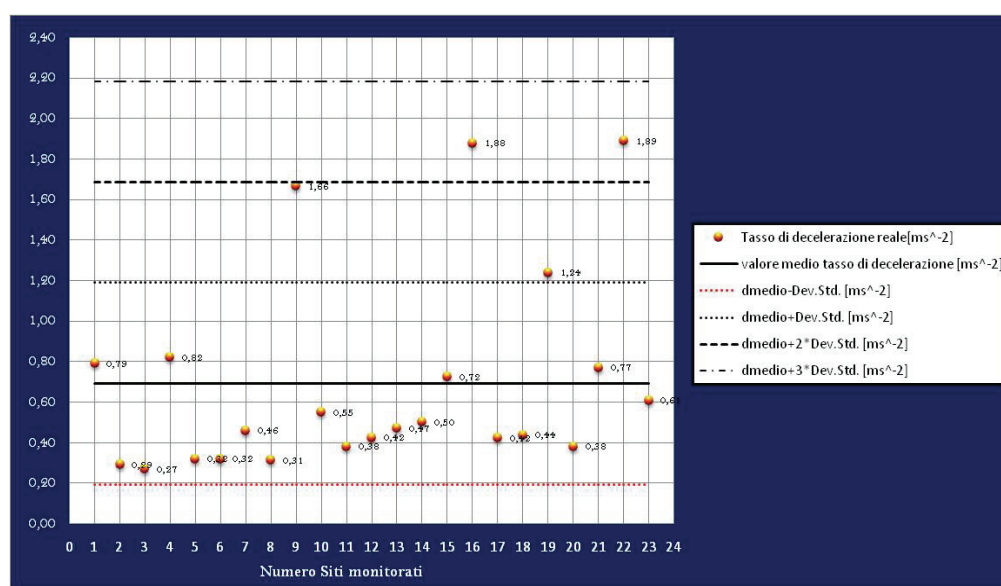


Figura 22_ Carta di Controllo Statistico dei Tassi di Decelerazione (I Gruppo)

La Carta di Controllo Statistico in Figura 22 non evidenzia anomalie nella distribuzione dei tassi di decelerazione appartenenti al primo gruppo, ricadenti totalmente nella fascia $[\mu - \sigma; \mu + 3\sigma] = [0,19 \text{ ms}^{-2}; 2,18 \text{ ms}^{-2}]$. In particolare, è possibile osservare come più della metà del campione esaminato, pari all'82%, ricada nel range $[\mu - \sigma; \mu + \sigma] = [0,19 \text{ ms}^{-2}; 1,19 \text{ ms}^{-2}]$, dove il massimo scostamento registrato dal valore medio è pari a $0,82 \text{ ms}^{-2} - 0,69 \text{ ms}^{-2} = 0,13 \text{ ms}^{-2}$.

L'elaborazione dei tassi di decelerazione, appartenenti, invece, al secondo gruppo, ha fornito i risultati restituiti in Tabella 15 dove il tronco di transizione si sviluppa mediamente per 62 m, ripartendosi nel 57% sul rettilo di approccio – curva e nel restante 43% sulla medesima curva. Il valore medio stimato del tasso di decelerazione è pari a $0,72 \text{ ms}^{-2}$.

Tabella 15_ Stima Tassi di Decelerazione (II Gruppo)

Valore medio osservato			
d [ms^{-2}]	L _d [m]	t _d [%]	c _d [%]
0,72	62	57	43

Così come compiuto nel primo caso, è stato eseguito un controllo statistico dei 13 siti utili come mostrato in Figura 23, per la definizione del valore medio del tasso di decelerazione relativamente al secondo gruppo.

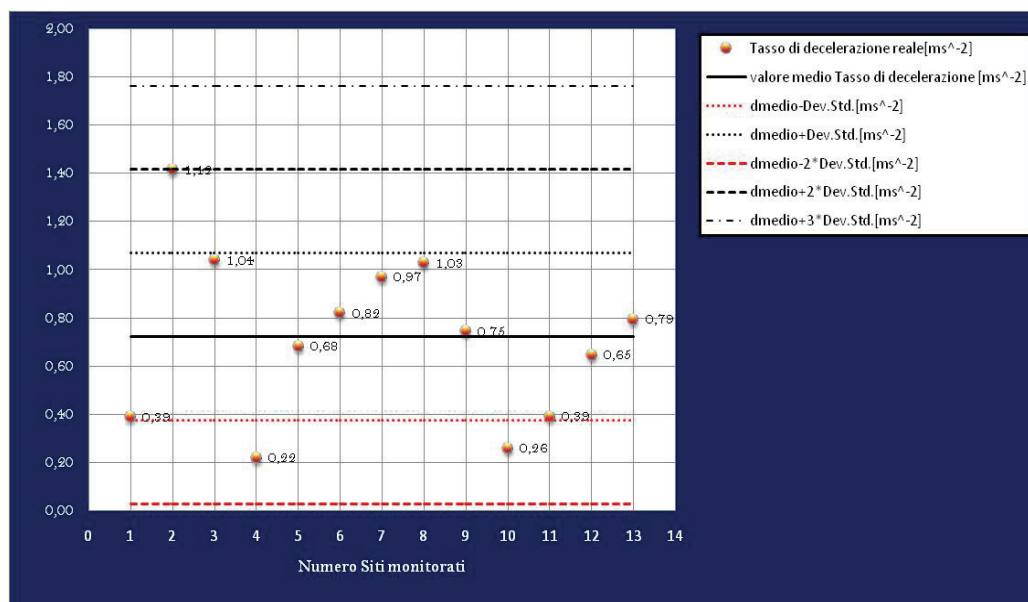


Figura 23_ Carta di Controllo Statistico dei Tassi di Decelerazione (II Gruppo)

La carta di Controllo non evidenzia anomalie nella distribuzione dei tassi di decelerazione del II gruppo che ricadono totalmente nella fascia $[\mu - 2\sigma; \mu + 3\sigma] =$

$[0,029 \text{ ms}^{-2}; 1,77 \text{ ms}^{-2}]$. In particolare, è possibile osservare come più della metà del campione esaminato, pari al 77%, ricada nel range $[\mu - \sigma; \mu + \sigma] = [0,38 \text{ ms}^{-2}; 1,07 \text{ ms}^{-2}]$, dove il massimo scostamento registrato dal valore medio è pari a $1,04 \text{ ms}^{-2} - 0,72 \text{ ms}^{-2} = 0,32 \text{ ms}^{-2}$.

Una nuova stima del valore medio del tasso di accelerazione è stata, altresì, condotta, suddividendo il campione iniziale di 34 siti in due gruppi: il primo composto da 18 siti, con sviluppo dei rettifili di allontanamento – curva superiore a 120 m e lunghezza delle curve circolari superiore a 56 m, il secondo composto, invece, da 15 siti, con sviluppo dei rettifili di allontanamento - curva inferiore a 120 m e curve circolari di sviluppo inferiore a 56 m, per le ragioni precedentemente esposte.

L'elaborazione dei dati, appartenenti al primo gruppo, ha fornito i risultati mostrati in Tabella 16 dove il valore medio del tronco di transizione L_a è pari a 170 m, ripartendosi nel 67% sul rettifilo di allontanamento – curva e nel restante 33% sulla medesima curva. Il nuovo valore medio del tasso di accelerazione, per il primo gruppo di misure, è pari a $0,65 \text{ ms}^{-2}$.

Tabella 16_ Stima Tassi di Accelerazione (I Gruppo)

Valore medio osservato			
a [ms^{-2}]	L_a [m]	t_a [%]	c_a [%]
0,65	170	67	33

Preliminare alla definizione di un valore medio del tasso di accelerazione, è stato, in ogni caso, il controllo statistico dei 18 siti utili, come mostrato in Figura 24.

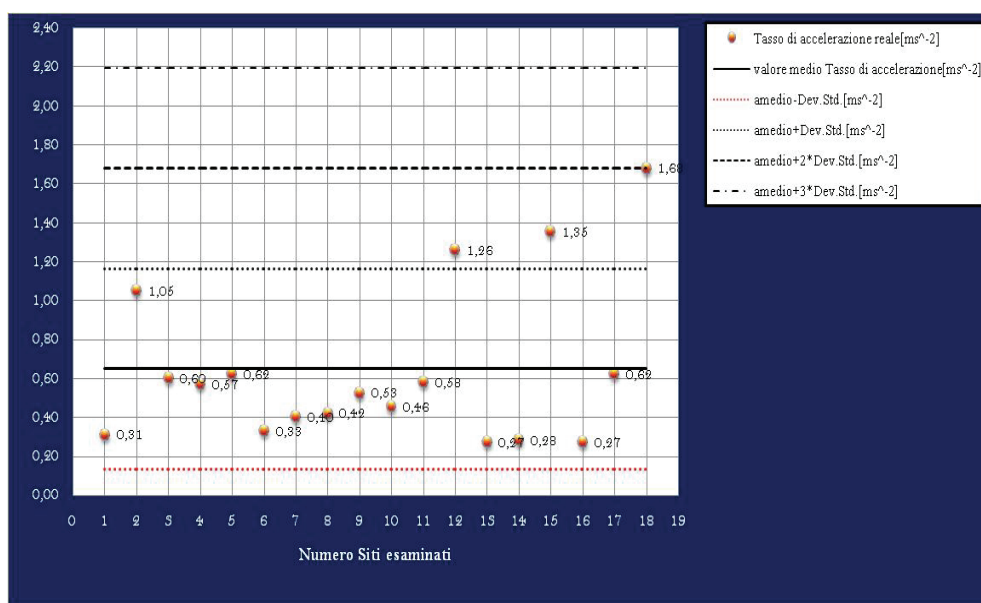


Figura 24_ Carta di Controllo Statistico dei Tassi di Accelerazione (I Gruppo)

La Carta di Controllo Statistico in Figura 24 non evidenzia anomalie nella distribuzione dei tassi di accelerazione del I gruppo che ricadono totalmente nella fascia $[\mu - \sigma; \mu + 3\sigma] = [0,14 \text{ ms}^{-2}; 2,19 \text{ ms}^{-2}]$. In particolare, è possibile osservare come più della metà del campione esaminato, pari all'83%, ricada nel range $[\mu - \sigma; \mu + \sigma] = [0,14 \text{ ms}^{-2}; 1,16 \text{ ms}^{-2}]$, dove il massimo scostamento registrato dal valore medio è pari a $1,35 \text{ ms}^{-2} - 0,65 \text{ ms}^{-2} = 0,70 \text{ ms}^{-2}$.

L'elaborazione, invece, dei tassi di accelerazione appartenenti al secondo gruppo ha fornito i risultati mostrati in Tabella 17 dove il tronco di transizione, con sviluppo medio pari a 80 m, si ripartisce nel 31% sul rettifilo di allontanamento – curva e nel restante 69% sulla medesima curva. Il valore medio del tasso di accelerazione, è pari a $0,73 \text{ ms}^{-2}$.

Tabella 17_ Stima Tassi di Accelerazione (II Gruppo)

Valore medio osservato			
a [ms^{-2}]	L _a [m]	t _a [%]	c _a [%]
0,73	80	31	69

La definizione di un valore medio del tasso di accelerazione, per i 15 siti interessati, è stata preceduta, ovviamente, da un controllo statistico dei tassi misurati come presentato in Figura 25.

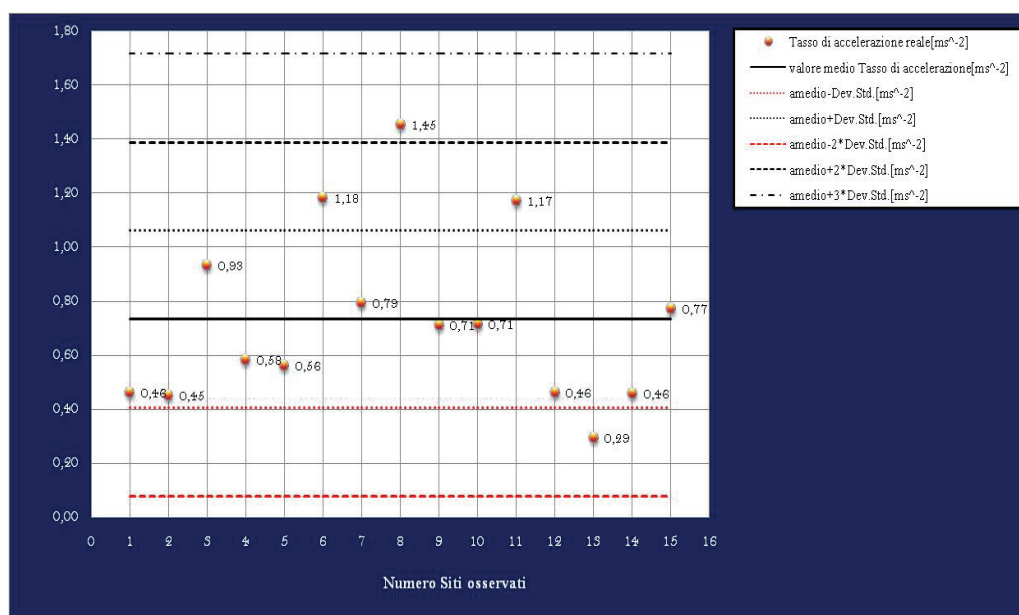


Figura 25_ Carta di Controllo Statistico dei Tassi di Accelerazione (II Gruppo)

La Carta di Controllo Statistico in Figura 25 non evidenzia anomalie nella

distribuzione dei tassi di accelerazione che ricadono totalmente nella fascia $[\mu - 2\sigma; \mu + 3\sigma] = [0,075 \text{ ms}^{-2}; 1,71 \text{ ms}^{-2}]$. In particolare, è possibile osservare come più della metà del campione esaminato, pari al 73%, ricada nel range $[\mu - \sigma; \mu + \sigma] = [0,40 \text{ ms}^{-2}; 1,06 \text{ ms}^{-2}]$, dove il massimo scostamento registrato dal valore medio è pari a $0,93 \text{ ms}^{-2} - 0,73 \text{ ms}^{-2} = 0,20 \text{ ms}^{-2}$.

4.3.2.3 Analisi Statistica dei Tassi di Decelerazione ed Accelerazione

T-tests sono stati effettuati per verificare se il valore medio stimato dei nuovi tassi di decelerazione ed accelerazione, suddivisi in due specifici gruppi, come illustrato nel corso del paragrafo 4.3.2.2, fosse significativamente differente da valori costanti suggeriti da gruppi di ricercatori internazionali e nazionali [62] [10] e da alcune Normative di settore [7] [15].

L'analisi statistica è stata condotta, anche in questo caso, con l'ausilio del software "Statistica 7".

Per verificare se il valore medio stimato dei tassi fosse statisticamente differente dal valore di $0,85 \text{ ms}^{-2}$, proposto da Lamm et al. [62], una serie di t-tests sono stati sviluppati con l'ipotesi nulla H_0 coincidente con la condizione di un valore medio stimato dei tassi di decelerazione (d_{mv85}) ed accelerazione (a_{mv85}) non statisticamente differente da $0,85 \text{ ms}^{-2}$.

I risultati del t-test, condotto sul I e II gruppo dei tassi di decelerazione, sono mostrati nel primo summary delle Tabelle 18 e 19, rispettivamente, dove si osserva che il valore medio stimato del tasso del I gruppo pari a $0,69 \text{ ms}^{-2}$ e quello del II gruppo pari a $0,72 \text{ ms}^{-2}$ non sono statisticamente differenti da $0,85 \text{ ms}^{-2}$, per un livello di significatività α fissato al 5%, contrariamente a quanto ritrovato da Fitzpatrick et al. [10].

I risultati del t-test sul I e II gruppo dei tassi di accelerazione ed illustrati nel primo summary delle Tabelle 20 e 21, rispettivamente, mostrano che il valore medio del tasso del I gruppo, pari a $0,64 \text{ ms}^{-2}$, è statisticamente differente da $0,85 \text{ ms}^{-2}$, a differenza del valore medio del II gruppo, pari a $0,73 \text{ ms}^{-2}$, per un livello di significatività α pari al 5%.

In seguito, un secondo t-test è stato sviluppato per verificare se il valore medio stimato dei tassi di decelerazione ed accelerazione, suddivisi nei due gruppi precedentemente dichiarati, fosse statisticamente differente dal valore costante di $0,80 \text{ ms}^{-2}$, suggerito dagli Standard di Progettazione geometrica italiana [7] e svizzera [15].

Tabella 18 t-Tests Tassi di Decelerazione I Gruppo

Variable	Test of means against reference constant							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
d [ms ⁻²]	0,691850	0,497348	23	0,103704	0,850000	-1,52501	22	0,141505

Variable	Test of means against reference constant							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
d [ms ⁻²]	0,691850	0,497348	23	0,103704	0,800000	-1,04287	22	0,308334

Tabella 19 t-Tests Tassi di Decelerazione II Gruppo

Variable	Test of means against reference constant							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
d [ms ⁻²]	0,723640	0,347260	13	0,096312	0,850000	-1,31198	12	0,214070

Variable	Test of means against reference constant							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
d [ms ⁻²]	0,723640	0,347260	13	0,096312	0,800000	-0,792838	12	0,443266

Tabella 20 t-Tests Tassi di Accelerazione I Gruppo

Variable	Test of means against reference constant							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
a [ms ⁻²]	0,644056	0,414085	18	0,097601	0,850000	-2,11007	17	0,049975

Variable	Test of means against reference constant							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
a [ms ⁻²]	0,644056	0,414085	18	0,097601	0,800000	-1,59778	17	0,128512

Tabella 21 t-Tests Tassi di Accelerazione II Gruppo

Variable	Test of means against reference constant							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
a [ms ⁻²]	0,731400	0,327733	15	0,084620	0,850000	-1,40156	14	0,182827

Variable	Test of means against reference constant							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
a [ms ⁻²]	0,731400	0,327733	15	0,084620	0,800000	-0,810681	14	0,431115

I risultati del t-test, condotto sul I e II gruppo dei tassi di decelerazione, presentati nel secondo summary delle Tabelle 18 e 19, rispettivamente, mostrano che sia il valore medio del I gruppo, pari a 0,69 ms⁻², che quello del II gruppo, pari a 0,72ms⁻², non è statisticamente differente da 0,80 ms⁻², per un livello fissato di significatività α pari al 5%, contrariamente a quanto ritrovato da B. Crisman et al. [64].

Analogamente, i risultati mostrati nel secondo summary delle Tabelle 20 e 21, concernente il t-test condotto sul I e II gruppo dei tassi di accelerazione, evidenziano che sia il valore medio del tasso del I gruppo, pari a 0,64 ms⁻², che del II gruppo, pari a 0,73 ms⁻², non è statisticamente differente da 0,80 ms⁻², per un livello fissato di significatività α pari al 5%.

In conclusione, l'utilizzo di un valore medio del tasso di decelerazione pari a $0,85 \text{ ms}^{-2}$ o $0,80 \text{ ms}^{-2}$ per la costruzione del profilo delle velocità operative lungo le zone di transizione, interpreta sufficientemente bene la reale riduzione di velocità rilevata sulle strade monitorate, ove invece il tasso di decelerazione è risultato di $0,69 \text{ ms}^{-2}$, quando lo sviluppo dei rettifili di approccio – curva è superiore a 83 m e la lunghezza delle curve circolari superiore a 56 m, pari, invece, a $0,72 \text{ ms}^{-2}$ quando lo sviluppo dei rettifili di approccio – curva è inferiore a 83 m e la lunghezza delle curve circolari inferiore a 56 m.

L'impiego di un tasso di accelerazione pari a $0,85 \text{ ms}^{-2}$ non interpreta, invece, la reale variazione di velocità nella fase di allontanamento – curva sulle strade extraurbane monitorate quando lo sviluppo dei rettifili in uscita dalla curva è superiore a 120 m e la lunghezza degli elementi circolari è superiore a 56 m. In questo caso, a seguito dell'indagine condotta, è più adeguato un valore medio del tasso di $0,64 \text{ ms}^{-2}$.

L'impiego, invece, di un tasso costante di accelerazione pari a $0,80 \text{ ms}^{-2}$ definisce, adeguatamente, quanto osservato in fase sperimentale sia quando lo sviluppo dei rettifili di allontanamento – curva è superiore a 120 m e la lunghezza delle curve circolari è superiore a 56 m, dove il valore medio del tasso osservato è pari a $0,64 \text{ ms}^{-2}$, sia nel caso di rettifili di allontanamento – curva con sviluppo inferiore a 120 m e curve circolari con lunghezza inferiore 56 m, dove il valore medio osservato del tasso è di $0,73 \text{ ms}^{-2}$.

4.4 Modelli di previsione dei Tassi di decelerazione ed accelerazione

Il valore medio stimato del tasso di decelerazione ed accelerazione, nell'ipotesi di moto uniforme lungo le distanze di transizione L_{ad} ed L_a , rispettivamente, consente di sviluppare una procedura finita ed efficace per la costruzione di un profilo continuo delle velocità operative, con l'ausilio di modelli predittivi delle V_{85} su rettilineo e curva [64].

L'analisi dei dati ha rivelato, tuttavia, che il reale comportamento di guida degli utenti nella fase di approccio ed allontanamento – curva può differire dalle ipotesi semplificatrici adottate. In effetti, il profilo delle V_{85} rilevate per senso di marcia mostra che le variazioni di velocità ΔV , tra due successive sezioni monitorate, non si presentano costanti sul tronco di approccio ed uscita dall'elemento curvilineo circolare, bensì si amplificano in prossimità di esso. La condizione che l'aliquota massima della decelerazione possa attivarsi, per esempio, poco prima o nel punto d'inizio della curvatura [63], può essere oggetto di analisi per le verifiche di sicurezza nella dinamica di un veicolo in moto, al contrario non è strettamente necessaria per perfezionare

l'efficacia di un modello di previsione dei tassi di decelerazione e/o accelerazione. Infatti, in questo caso il tasso di decelerazione e/o accelerazione è utilizzato per definire la distanza percorsa durante la riduzione e/o incremento di velocità e l'uso, pertanto, di un tasso medio costante, piuttosto che variabile, non comporta significative conseguenze nel processo di costruzione del profilo delle velocità [64].

Il differente valore dei tassi di decelerazione ed accelerazione sulle sei strade monitorate per i diversi siti esaminati ha suggerito che un valore medio costante per tutte le curve circolari, pur essendo di facile applicazione, non è propriamente coerente con le reali variazioni di velocità attinte dagli utenti sia in fase di approccio che di allontanamento – curva. Un modello di previsione del tasso consentirebbe, invece, di catturare le reali differenze di velocità tra sito e sito al fine anche di perfezionare quel valore finale più vicino alla realtà.

Sono state, di conseguenza, realizzate in prima approssimazione analisi di regressione multipla non lineare per identificare quali variabili indipendenti, ben correlate, potessero interpretare correttamente il fenomeno.

La procedura di regressione adottata è fondata sul metodo dei minimi quadrati, sviluppato secondo l'algoritmo di Gauss – Newton, basato sull'espansione in serie di Taylor della funzione proposta. Tale procedura asserisce che ogni funzione $f(x)$, derivabile in punto x_0 , con derivata fino all'ordine $n-1$ in un intervallo del punto x_0 , può essere approssimata con un polinomio $P(x)$, di grado minore o uguale ad $n-1$. Nel punto x_0 il polinomio $P(x)$ assume lo stesso valore della funzione $f(x)$, mentre per x diverso da x_0 approssima solamente il valore reale della $f(x)$. Arrestando, quindi, l'espansione alla derivata prima, se la funzione $f(x)$ è derivabile in un punto x_0 e si conosce $f(x_0)$, si può utilizzare la retta tangente alla funzione in x_0 per ottenere valori approssimati di $f(x)$ in un intorno di x_0 ; ciò è particolarmente utile quando l'espressione analitica di $f(x)$ è complessa [70].

L'analisi è stata condotta con l'ausilio del software “STATISTICA 7” che ha restituito, per ogni tentativo, il coefficiente di determinazione dell'espressione, indicativo della bontà della regressione, ed una tabella di riepilogo dove le principali informazioni statistiche relative alle variabili introdotte sono raccolte.

Le grandezze riportate nel summary sono le seguenti:

- Estimate = *Valore del coefficiente associato a ciascuna variabile indipendente*
- Standard Error = *Deviazione standard della media della popolazione* (Yule, 1897),
stimata con la (32)
- t-value = *Risultato del t-test*, secondo la (33), per verificare quanto ciascun
coefficiente sia significativamente diverso da zero

- $df = \text{Gradi di libertà (degrees of freedom) associati alla statistica}$
- $p\text{-level} = \text{Significatività statistica del coefficiente}$ (Brownlee, 1960); è una misura della veridicità del parametro e di quanto sia rappresentativo della popolazione. Un $p\text{-level}$ inferiore al 5% indica una probabilità molto bassa di rigettare un'ipotesi quando è vera, aumentando, di conseguenza l'ampiezza dell'intervallo di confidenza
- $\text{Lo. Conf Limit} - \text{Up. Conf Limit} = \text{Limite inferiore (low) e superiore (upper)}$
dell'intervallo di confidenza, dove si ritrovano, con un assegnato livello di probabilità (in genere pari al 95% per un livello di significatività α del 5%), i veri valori dei parametri stimati

4.4.1 Calibrazione e Taratura dei Modelli

La calibrazione dei modelli di previsione dei tassi di decelerazione ed accelerazione è stata eseguita applicando l'ordinario metodo dei minimi quadrati, come in precedenza illustrato. La procedura, sviluppata per successive iterazioni, restituisce il coefficiente di determinazione della regressione ed una tabella di riepilogo delle principali informazioni statistiche associate ai coefficienti “muti” delle variabili

4.4.1.1 Modello di Previsione del Tasso di Decelerazione

Il modello di previsione del tasso di decelerazione, in ms^{-2} , è stato elaborato suddividendo la base campionaria in tre gruppi a seguito delle numerose elaborazioni condotte che hanno suggerito tale struttura per una migliore interpretazione del fenomeno. Tutti i parametri inclusi nel modello sono associati ad un livello α di significatività statistica inferiore al 5%.

Con riferimento alle misure di decelerazione in Tabella 11, il campione è stato ripartito, pertanto, in tre classi in base al valore del CCR_S , in gon/km , per ciascun elemento curvilineo circolare: siti associati a $\text{CCRs} < 320 \text{ gon/km}$, siti associati a $320 \text{ gon/km} < \text{CCRs} < 635 \text{ gon/km}$, ed infine siti associati a $\text{CCRs} > 635 \text{ gon/km}$.

I tassi di decelerazione, valutati in corrispondenza dei siti con $\text{CCRs} < 320 \text{ gon/km}$, sono stati frazionati, ulteriormente, in due insiemi a seguito delle molteplici regressioni condotte: misure associate a siti con sviluppo del rettilineo che precede la

curva (L_{RP}) maggiore di 78 m e misure associate a siti con sviluppo del rettifilo che precede la curva inferiore a 78 m.

La definizione di un modello di previsione del tasso di decelerazione, con CCRs < 320 gon/km e $L_{RP} > 78$ m, è stata preceduta da un controllo statistico dei siti adoperati. La carta di Controllo in Figura 26 non evidenzia anomalie nella distribuzione dei tassi di decelerazione che ricadono totalmente nella fascia $[\mu - \sigma; \mu + 2\sigma] = [0,18 \text{ ms}^{-2}; 1,98 \text{ ms}^{-2}]$.

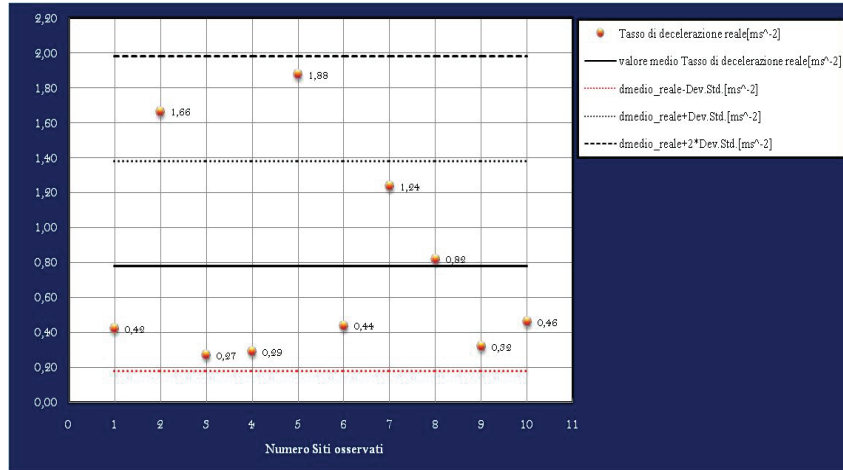


Figura 26_Carta di Controllo Tassi dec. per siti con CCR_s < 320 gon/km e L_{RP} > 78m

Il modello di previsione del tasso di decelerazione d , in ms^{-2} , per il gruppo di siti con CCRs < 320 gon/km e $L_{RP} > 78$ m assume la seguente espressione (34):

$$d = -5 \cdot 10^{-5} R^2 + 0,024 L_c - 2,4 \cdot 10^{-4} L_c^2 + 0,048 CCR_m - 2,7 \cdot 10^{-4} CCR_m^2 - 8,4 \cdot 10^{-4} L_{RP} \quad (34)$$

dove

R = Raggio dell'elemento curvilineo circolare esaminato, in metri

L_c = Sviluppo dell'elemento curvilineo circolare esaminato, in metri

CCR_m = Tasso di variazione medio di curvatura del tronco omogeneo nel quale s'inserisce la curva circolare, in gon/km

L_{RP} = Sviluppo del rettifilo che precede l'elemento curvilineo circolare osservato, in metri

Il coefficiente di determinazione del modello (34) è pari all'89%.

Le caratteristiche statistiche delle variabili indipendenti, introdotte nel modello predittivo, sono mostrate nel summary restituito dal programma in Tabella 22,

dove è confermato dal risultato del t -test che ciascun coefficiente è statisticamente differente da zero per un p -level inferiore al 5%.

Tabella 22 Statistica modello per tassi di dec. con $CCR_s < 320$ gon/km e $L_{RP} > 78$ m

Model is: $v7=a1*v2^2+a2*v3+a3*v3^2+a4*v5+a5*v5^2+a6*v6$ Dep. Var. : d [ms ⁻²]						
	Estimate	Standard error	t-value df = 4	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a1	-0,000005	0,000000	0,00	0,00	-0,000005	-0,000005
a2	0,024100	0,013510	0,00	0,00	-0,013410	0,061610
a3	-0,000240	0,000104	0,00	0,00	-0,000529	0,000049
a4	0,048652	0,039912	0,00	0,00	-0,062161	0,159465
a5	-0,000273	0,000589	0,00	0,00	-0,001909	0,001364
a6	-0,000838	0,000197	0,00	0,00	-0,001384	-0,000291

Una successiva elaborazione delle misure di decelerazione secondo il raggruppamento in precedenza indicato ha fornito i risultati esibiti in Tabella 23 dove il tronco di transizione, con sviluppo medio di 145 m, si ripartisce nel 55% sul rettilo di approccio – curva e nel restante 45% sulla medesima curva a partire dalla sezione PC.

Tabella 23 Tronco di Transizione L_d per siti con $CCR_s < 320$ gon/km e $L_{RP} > 78$ m

Valore medio osservato			
d [ms ⁻²]	L_d [m]	t_d [%]	c_d [%]
da modello	145	55	45

Il diagramma di Performance, illustrato in Figura 27, riporta in ascissa il valore misurato del tasso di decelerazione, in ms⁻², ed in ordinata il valore predetto del tasso di decelerazione, in ms⁻² secondo la (34). I punti, disponendosi intorno alla bisettrice del primo quadrante, evidenziano una corretta interpretazione del fenomeno da parte del modello; valori predetti e rilevati registrano, infatti, non forti scostamenti.

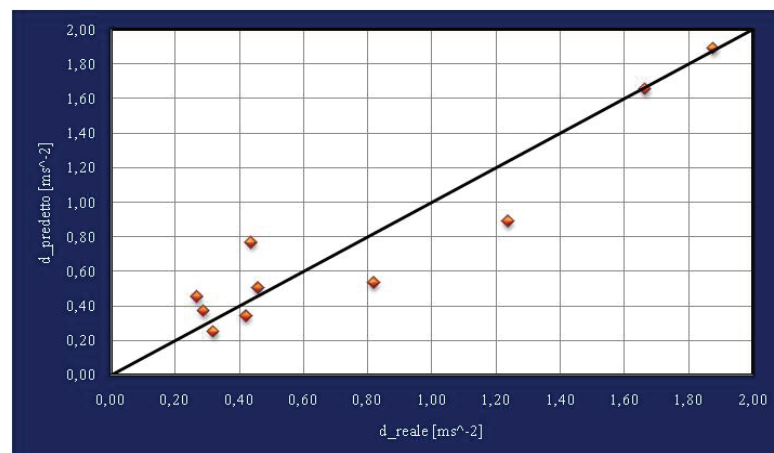


Figura 27_ Diagramma di Performance modello (34) con $CCR_s < 320$ gon/km e $L_{RP} > 78$ m

La calibrazione, invece, del modello di previsione del tasso di decelerazione per

i siti con $CCRs < 320 \text{ gon/km}$ e $35 \text{ m} < L_{RP} < 78 \text{ m}$ non ha restituito i risultati auspicati; infatti, le regressioni hanno riportato un coefficiente di determinazione non soddisfacente, nonostante le variabili introdotte fossero altamente significative. Per tali siti si è preferito stimare un valore medio delle principali grandezze adoperate nella procedura di costruzione del profilo delle velocità operative.

I risultati dell'elaborazione, relativa al raggruppamento dei siti innanzi indicato, sono presentati in Tabella 24, dove si osserva che il tronco di transizione si sviluppa mediamente per 69 m ripartendosi nel 51% sul rettifilo di approccio – curva e nel restante 49% sulla medesima curva. Il valore medio del tasso di decelerazione, relativo a tale raggruppamento, è pari a $0,90 \text{ ms}^{-2}$.

Tabella 24 Tronco di Transizione L_d per siti con $CCRs < 320 \text{ gon/km}$ e $35\text{m} < L_{RP} < 78\text{m}$

Valore medio osservato			
$d [\text{ms}^{-2}]$	$L_d [\text{m}]$	$t_d [\%]$	$c_d [\%]$
0,90	69	51	49

I tassi di decelerazione misurati, invece, in corrispondenza dei siti con $320 \text{ gon/km} < CCRs < 635 \text{ gon/km}$ sono stati frazionati, ulteriormente, in due insiemi a seguito delle iterazioni condotte: misure associate ai siti con $L_{RP} > 50 \text{ m}$ e misure associate ai siti con $L_{RP} < 50 \text{ m}$.

Il modello di previsione del tasso di decelerazione, con $320 \text{ gon/km} < CCRs < 635 \text{ gon/km}$ e $L_{RP} > 50 \text{ m}$, è stato precorso da un controllo statistico dei valori stimati.

La Carta di Controllo in Figura 28 non evidenzia anomalie nella distribuzione dei tassi, ricadenti tutti nella fascia $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma] = [0,086 \text{ ms}^{-2}; 0,80 \text{ ms}^{-2}]$.

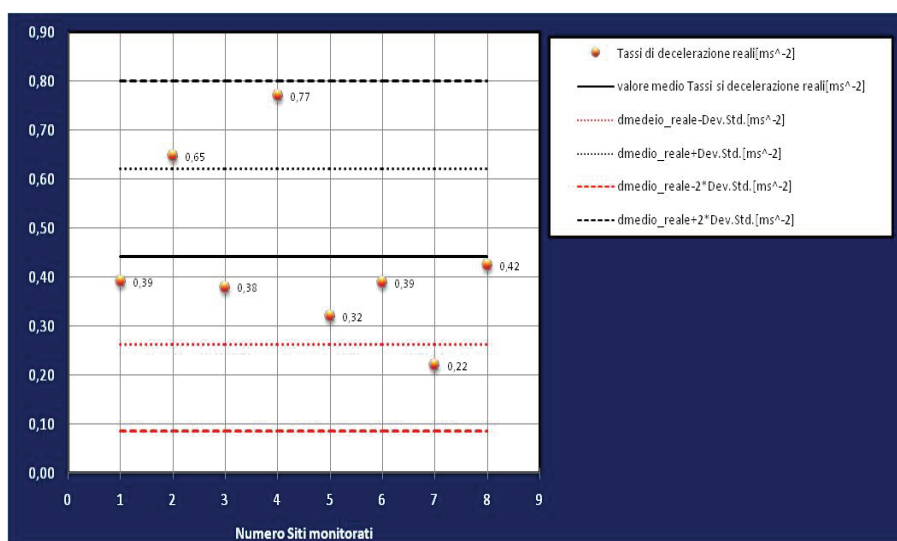


Figura 28_Carta di Controllo tassi dec. siti con $320\text{gon/km} < CCRs < 635 \text{ gon/km}$ e $L_{RP} > 50\text{m}$

Il modello di previsione del tasso di decelerazione d , in ms^{-2} , per il gruppo di siti con $320 \text{ gon/km} < \text{CCRs} < 635 \text{ gon/km}$ e $L_{\text{RP}} > 50 \text{ m}$, assume la seguente espressione (35):

$$d = 2,2 \cdot 10^{-5} R^2 - 0,0013 L_c + 0,0048 \text{CCR}_m - 2,1 \cdot 10^{-5} \text{CCR}_m^2 - 4,3 \cdot 10^{-4} L_{\text{RP}} \quad (35)$$

Il coefficiente di determinazione del modello (35) è pari al 60%.

Le caratteristiche statistiche delle variabili indipendenti introdotte nel modello predittivo sono mostrate nel summary restituito dal programma in Tabella 25, dove è evidente che ciascun coefficiente è statisticamente differente da zero per un p -level inferiore al 5%.

Tabella 25 Statistica modello per tassi di dec. con $320 \text{ gon/km} < \text{CCR}_s < 635 \text{ gon/km}$ e $L_{\text{RP}} > 50 \text{ m}$

Model is: $v7 = a1 \cdot v^2 + a2 \cdot v^3 + a3 \cdot v^5 + a4 \cdot v^5^2 + a5 \cdot v^6$ Dep. Var.: d [ms^{-2}]						
	Estimate	Standard error	t-value df = 3	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a1	0,000022	0,000000	0,00	0,00	0,000022	0,000022
a2	-0,001289	0,001818	0,00	0,00	-0,007075	0,004497
a3	0,004824	0,003041	0,00	0,00	-0,004854	0,014502
a4	-0,000021	0,000013	0,00	0,00	-0,000064	0,000021
a5	-0,000434	0,000744	0,00	0,00	-0,002803	0,001935

Una successiva elaborazione delle misure di decelerazione secondo il raggruppamento sopra indicato ha fornito i risultati mostrati in Tabella 26 dove il tronco di transizione, sviluppandosi mediamente per 106 m, si ripartisce nel 49% sul rettilineo di approccio – curva e nel restante 51% sulla medesima curva.

Tabella 26 Tronco di Transizione L_d per siti con $320 \text{ gon/km} < \text{CCR}_s < 635 \text{ gon/km}$ e $L_{\text{RP}} > 50 \text{ m}$

Valore medio osservato			
d [ms^{-2}]	L_d [m]	t_d [%]	c_d [%]
da modello	106	49	51

Il diagramma di Performance del modello predittivo (35) è illustrato in Figura 29. I punti, addensandosi intorno alla bisettrice del primo quadrante fanno risaltare l'efficace e l'adeguatezza del modello con modesto scarto tra valore predetto ed osservato.

Il tentativo di calibrazione, invece, di un modello di previsione dei tassi di decelerazione per siti monitorati con $320 \text{ gon/km} < \text{CCRs} < 635 \text{ gon/km}$ e $L_{\text{RP}} < 50 \text{ m}$ non ha prodotto risultati numerici sufficientemente validi; in tale circostanza si è optato per la stima di un valore medio delle principali grandezze impiegate per la costruzione del profilo delle velocità operative.

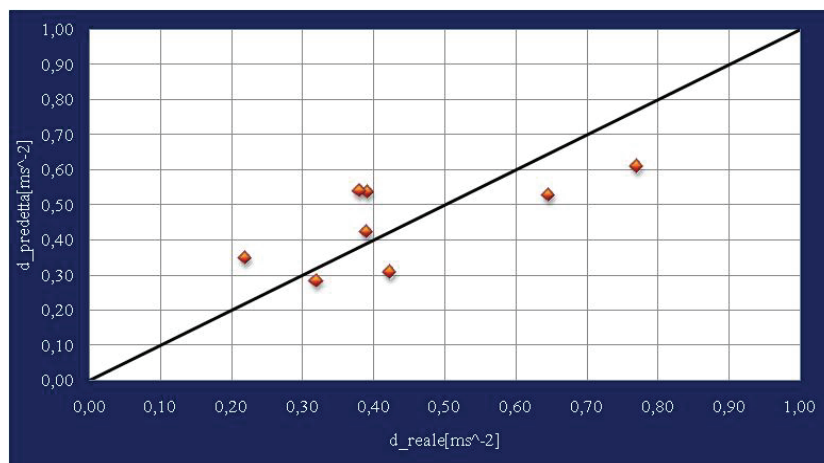


Figura 29_ Diagramma di Performance (35) con $320 \text{ gon/km} < CCR_s < 635 \text{ gon/km}$ e $L_{RP} > 50 \text{ m}$

I risultati dell'elaborazione, presentati in Tabella 27, mostrano che il tronco di transizione si sviluppa mediamente per 49 m sulle strade esaminate, interessando solo l'elemento curvilineo circolare a partire dalla sezione d'inizio – curva. Il valore medio del tasso di decelerazione, relativo a tale insieme, è pari a $1,23 \text{ ms}^{-2}$.

Tabella 27 Tronco di Transizione L_d per siti $320 \text{ gon/km} < CCR_s < 635 \text{ gon/km}$ e $L_{RP} < 50 \text{ m}$

Valore medio osservato			
$d [\text{ms}^{-2}]$	$L_d [\text{m}]$	$t_d [\%]$	$c_d [\%]$
1,23	49	0	100

Infine, il campione dei tassi di decelerazione relativi ai siti con $CCR_s > 636 \text{ gon/km}$ è stato frazionato, ulteriormente, in due sotto – insiemi a seguito delle numerose regressioni condotte: misure associate a siti con $L_{RP} > 180 \text{ m}$ e misure associate a siti con $L_{RP} < 180 \text{ m}$.

In realtà, il tentativo di calibrazione di un modello di previsione del tasso di decelerazione, per i due raggruppamenti, non ha sortito gli effetti desiderati, cosicché si è preferito stimare il valore medio delle principali grandezze impiegate nella costruzione del profilo delle velocità operative.

I risultati dell'elaborazione, mostrati nelle Tabelle 28 e 29 e sottoposti precedentemente a controllo statistico con adeguata Carta di Controllo per rilevare eventuali anomalie, mostrano che per i siti associati ad un valore del $CCR_s > 636 \text{ gon/km}$ e $L_{RP} > 180 \text{ m}$, il tronco di transizione si sviluppa mediamente per 207 m sulle strade esaminate, ripartendosi nel 91% sul rettilineo di approccio – curva e nel restante 9% sulla medesima curva a partire dalla sezione d'inizio – curva. Il valore medio del tasso di decelerazione, relativo a tale insieme di misure, è pari a $0,56 \text{ ms}^{-2}$.

I siti, invece, accoppiati ad un valore del $CCR_s > 636 \text{ gon/km}$ e $40 \text{ m} < L_{RP} <$

180m riportano, come presentato in Tabella 29, uno sviluppo medio del tronco di transizione pari a 64 m, ripartendosi nel 72% sul rettifilo di approccio – curva e nel restante 28% sulla medesima curva a partire dalla sezione d’inizio – curva.

Il valore medio del tasso di decelerazione, relativo a tale insieme di misure, è pari a $0,77 \text{ ms}^{-2}$.

Tabella 28 d e L_d per siti con $CCR_s > 636 \text{ gon/km}$ e $L_{RP} > 180 \text{ m}$

Valore medio osservato			
$d [\text{ms}^{-2}]$	$L_d [\text{m}]$	$t_d [\%]$	$c_d [\%]$
0,56	207	91	9

Tabella 29 d e L_d per siti con $CCR_s > 636 \text{ gon/km}$ e $40 \text{ m} < L_{RP} < 180 \text{ m}$

Valore medio osservato			
$d [\text{ms}^{-2}]$	$L_d [\text{m}]$	$t_d [\%]$	$c_d [\%]$
0,77	64	72	28

4.4.1.1 Analisi Statistica dei Tassi di Decelerazione

T-tests sono stati effettuati, per verificare se il valore medio stimato dei tassi di decelerazione, non coinvolti nelle procedure di calibrazione dei modelli predittivi e suddivisi in specifiche sotto - classi, come illustrato nel corso del paragrafo 4.4.1.1, fosse statisticamente differente da valori suggeriti in letteratura.

Inizialmente è stata analizzata la differenza tra valore medio sperimentale e $0,85 \text{ ms}^{-2}$, proposto da Lamm et al. [62], dove l’ipotesi nulla H_0 coincideva con la condizione di valore medio stimato del tasso di decelerazione non statisticamente differente da $0,85 \text{ ms}^{-2}$.

I risultati, presentati nel primo summary delle Tabelle 30, 31, 32 e 33, evidenziano che l’unico valore medio stimato del tasso di decelerazione statisticamente differente da $0,85 \text{ ms}^{-2}$, per un livello di significatività α del 5%, è pari a $0,56 \text{ ms}^{-2}$ associato al sottogruppo dei siti con $CCR_s > 635 \text{ gon/km}$ e $L_{RP} > 180 \text{ m}$.

Tabella 30 t-test Tassi di Decelerazione con $CCR_s < 320 \text{ gon/km}$ e $L_{RP} < 78 \text{ m}$

Variable	Test of means against reference constant (value)							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
$d [\text{ms}^{-2}]$	0,895000	0,106066	2	0,075000	0,850000	0,600000	1	0,655958

Variable	Test of means against reference constant (value)							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
$d [\text{ms}^{-2}]$	0,895000	0,106066	2	0,075000	0,800000	1,266667	1	0,425446

Tabella 31_ t-test Tassi di Decelerazione con $320 \text{ gon/km} < \text{CCR}_s < 635 \text{ gon/km}$ e $L_{RP} < 50\text{m}$

Variable	Test of means against reference constant (value)							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
d [ms ⁻²]	1,228444	0,265702	2	0,187880	0,850000	2,014289	1	0,293358

Variable	Test of means against reference constant (value)							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
d [ms ⁻²]	1,228444	0,265702	2	0,187880	0,800000	2,280417	1	0,263091

Tabella 32 t-test Tassi di Decelerazione con $\text{CCR}_s > 635 \text{ gon/km}$ e $L_{RP} > 180\text{m}$

Variable	Test of means against reference constant (value)							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
d [ms ⁻²]	0,559052	0,195356	5	0,087366	0,850000	-3,33023	4	0,029100

Variable	Test of means against reference constant (value)							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
d [ms ⁻²]	0,559052	0,195356	5	0,087366	0,800000	-2,75792	4	0,050958

Tabella 33 t-test Tassi di Decelerazione con $\text{CCR}_s > 635 \text{ gon/km}$ e $L_{RP} < 180\text{m}$

Variable	Test of means against reference constant (value)							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
d [ms ⁻²]	0,770892	0,476106	9	0,158702	0,850000	-0,498471	8	0,631566

Variable	Test of means against reference constant (value)							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
d [ms ⁻²]	0,770892	0,476106	9	0,158702	0,800000	-0,183415	8	0,859036

In seguito, un secondo t-test è stato sviluppato per verificare se il valore medio stimato dei tassi fosse statisticamente differente da $0,80 \text{ ms}^{-2}$ suggerito dagli Standards di progettazione geometrica italiana [7] e svizzera [15].

I risultati sono mostrati nel secondo summary delle Tabelle 30, 31, 32 e 33.

E' presentato come nessun valore medio stimato del tasso di decelerazione, associato a ciascun dei quattro raggruppamenti, è statisticamente differente da $0,80 \text{ ms}^{-2}$ per un livello di significatività α fissato al 5%.

In conclusione, l'utilizzo di un valore medio del tasso di decelerazione pari a $0,85 \text{ ms}^{-2}$ o $0,80 \text{ ms}^{-2}$ interpreta adeguatamente la reale riduzione di velocità nella fase di approccio - curva sulle strade monitorate, malgrado sia più corretto avvalersi di quello misurato, con esclusione dei siti dove il $\text{CCR}_s > 635 \text{ gon/km}$ e $L_{RP} > 180 \text{ m}$ poiché la costante $0,85 \text{ ms}^{-2}$ è statisticamente differente dal valore medio osservato.

4.4.1.2 Modello di Previsione del Tasso di Accelerazione

Il modello di previsione del tasso di accelerazione, in ms^{-2} , è stato elaborato suddividendo la base campionaria in due macro – insiemi: misure associate ai siti con $L_{RP} > 283$ m e misure associate ai siti con $L_{RP} < 283$ m. Tutti le variabili adottate nei modelli sono associate ad un livello α di significatività statistica inferiore al 5%.

La calibrazione di un modello di previsione del tasso di accelerazione, per i siti con $L_{RP} > 283$ m, è stata preceduta da un controllo statistico delle misure.

La carta di Controllo in Figura 30 non evidenzia anomalie nella distribuzione dei tassi di accelerazione che ricadono nella fascia $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma] = [-0,16 \text{ ms}^{-2}; 1,36 \text{ ms}^{-2}]$.

Il modello di previsione del tasso di accelerazione a , in ms^{-2} , per siti con $L_{RP} > 283$ m, assume la seguente espressione (36):

$$a = 0,0057R - 1,5 \cdot 10^{-5}R^2 - 0,034CCR_m + 5,3 \cdot 10^{-4}CCR_m^2 + 7,1 \cdot 10^{-4}L_{RP} - 1,4 \cdot 10^{-7}L_{RP}^2 \quad (36)$$

Il coefficiente di determinazione del modello è pari al 55%.

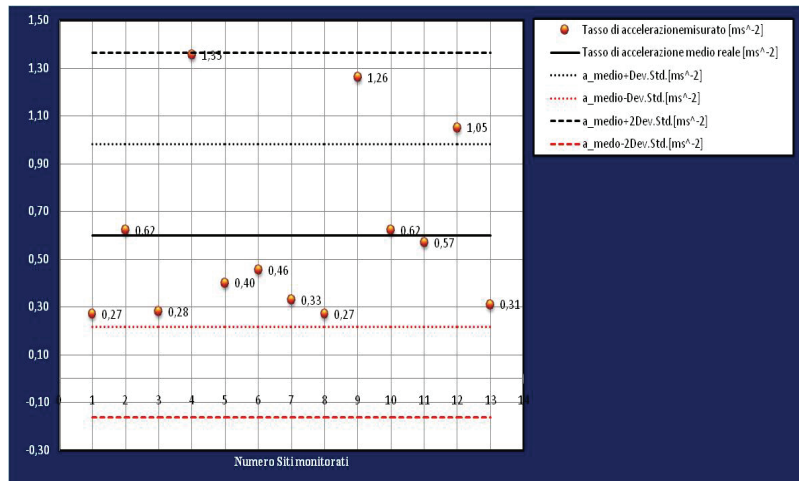


Figura 30_Carta di Controllo Tassi acc. per siti con $L_{RP} > 283$ m

Le caratteristiche statistiche delle variabili introdotte nel modello (36) sono mostrate nel summary restituito dal programma in Tabella 34, dove è evidente che ciascun coefficiente è statisticamente differente da zero con un p -level inferiore al 5%.

Tabella 34 Statistica modello tassi di acc. per siti con $L_{RP} > 283$ m

Model is: $v7=a1*v2+a2*v2^2+a3*v5+a4*v5^2+a6*v6+a7*v6^2$ Dep. Var. : a [ms ⁻²]						
	Estimate	Standard error	t-value df = 7	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a1	0,00572679	0,003810	0,00	0,00	-0,003283	0,014737
a2	-0,00001470	0,000000	0,00	0,00	-0,000015	-0,000015
a3	-0,03356824	0,024582	0,00	0,00	-0,091695	0,024558
a4	0,00053388	0,000405	0,00	0,00	-0,000425	0,001492
a6	0,00070472	0,000432	0,00	0,00	-0,000318	0,001727
a7	-0,00000014	0,000000	0,00	0,00	-0,000000	-0,000000

Successive elaborazioni dei tassi di accelerazione, secondo la suddivisione stabilita, hanno fornito i risultati esibiti in Tabella 35 dove il tronco di transizione, sviluppandosi mediamente per 185 m, si ripartisce nel 77% sul rettilo di allontanamento – curva e nel restante 23% sulla medesima curva a partire dalla sezione PT.

Tabella 35 Tronco di Transizione L_a per siti con $L_{RP} > 283$ m

Valore medio osservato			
d [ms ⁻²]	L_a [m]	t_d [%]	c_d [%]
da modello	185	77	23

Il diagramma di Performance del modello (36), illustrato in Figura 31, evidenzia una sua corretta interpretazione della reale variazione di velocità attinta dagli utenti in ingresso curva; infatti, i punti, disponendosi equamente intorno alla bisettrice del primo quadrante denotano un ridotto scostamento tra valore predetto ed osservato.

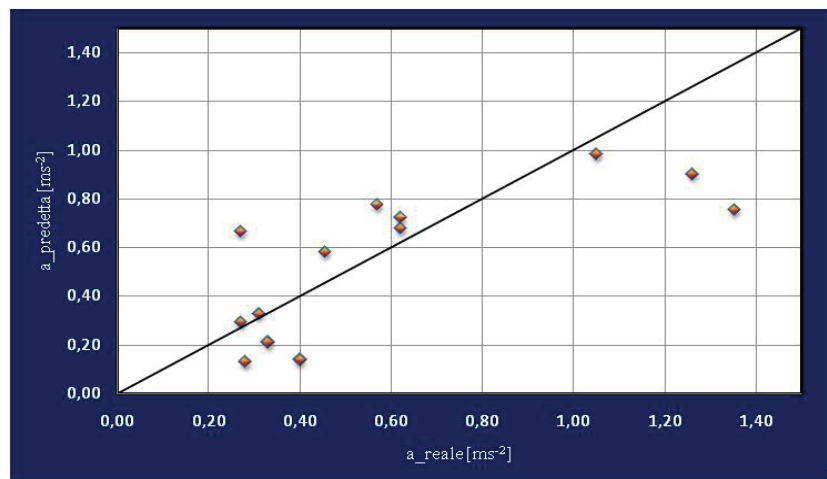


Figura 31_ Diagramma di Performance del modello (36) per siti con $L_{RP} > 283$ m

I tassi di accelerazione, relativi ai siti con $L_{RP} < 283$ m, sono stati frazionati in due sotto – insiemi per le limitazioni geometriche degli elementi componenti il tracciato, che in alcuni casi non offrivano la possibilità di rispettare la reale ripartizione della

transizione tra rettilo e curva. Il primo insieme raggruppa le misure associate ai siti con $L_{RP} > 37$ m, mentre il secondo le misure associate ai siti con $L_{RP} \leq 37$ m.

In realtà la calibrazione del modello di previsione del tasso di accelerazione per siti con $L_{RP} < 283$ m non ha sortito gli effetti desiderati, cosicché si è preferito ultimare il processo calcolando il valore medio delle grandezze impiegate nella costruzione del profilo delle velocità operative.

I risultati delle elaborazioni sono presentati nelle Tabelle 36 e 37.

La Tabella 36 evidenzia che in presenza di siti con $37 \text{ m} < L_{RP} < 180$ m il tronco di transizione percorso in accelerazione si sviluppa mediamente per 102 m sulle strade esaminate, con ripartizione del 36% sul rettilo di allontanamento – curva e del restante 64% sulla medesima curva a partire dalla sezione di fine – curva. Il valore medio del tasso di accelerazione è pari a $0,71 \text{ ms}^{-2}$.

La Tabella 37 evidenzia, invece, che i siti, accoppiati ad un valore di $L_{RP} \leq 37$ m, presentano uno sviluppo medio del tronco di transizione di 71 m con ripartizione del 33% sul rettilo di allontanamento – curva e del restante 67% sulla medesima curva a partire dalla sezione di fine – curva. Il valore medio del tasso di accelerazione, relativo a tale insieme di misure, è pari a $0,87 \text{ ms}^{-2}$.

Tabella 36 a e L_a per siti con $37 \text{ m} < L_{RP} < 283 \text{ m}$

Valore medio osservato			
$a \text{ [ms}^{-2}\text{]}$	$L_a \text{ [m]}$	$t_a \text{ [\%]}$	$c_a \text{ [\%]}$
0,71	102	36	64

Tabella 37 a e L_a per siti con $L_{RP} \leq 37 \text{ m}$

Valore medio osservato			
$a \text{ [ms}^{-2}\text{]}$	$L_a \text{ [m]}$	$t_a \text{ [\%]}$	$c_a \text{ [\%]}$
0,87	71	33	67

4.4.1.2.1 Analisi Statistica dei Tassi di Accelerazione

T-tests sono stati effettuati per verificare se il valore medio stimato dei tassi di accelerazione con $L_{RP} < 283$ m, come illustrato nel corso del paragrafo 4.4.1.2, fosse significativamente differente dal valore di $0,85 \text{ ms}^{-2}$ proposto da Lamm et al. [62].

L'ipotesi nulla H_0 coincide con l'affermare che il valore medio stimato del tasso di accelerazione non è statisticamente differente da $0,85 \text{ ms}^{-2}$.

I risultati del t-test, presentati nel primo summary delle Tabelle 38 e 39, evidenziano che alcun valore medio del tasso di accelerazione stimato, associato a ciascuno dei due sottogruppi individuati, è statisticamente differente da $0,85 \text{ ms}^{-2}$ per un

livello di significatività α fissato al 5%.

Tabella 38 t-test Tassi di Accelerazione con $37\text{m} < L_{RP} < 283\text{m}$

Variable	Test of means against reference constant (value)							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
a [ms-2]	0,707412	0,379877	17	0,092134	0,850000	-1,54762	16	0,141263

Variable	Test of means against reference constant (value)							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
a [ms-2]	0,707412	0,379877	17	0,092134	0,800000	-1,00493	16	0,329886

Tabella 39 t-test Tassi di Accelerazione con $L_{RP} < 37\text{m}$

Variable	Test of means against reference constant (value)							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
a [ms-2]	0,865000	0,254100	4	0,127050	0,850000	0,118064	3	0,913478

Variable	Test of means against reference constant (value)							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
a [ms-2]	0,865000	0,254100	4	0,127050	0,800000	0,511610	3	0,644202

In seguito, un secondo t-test è stato sviluppato per verificare se il valore medio stimato dei tassi fosse statisticamente differente dal valore costante di $0,80 \text{ ms}^{-2}$ [7]. I risultati, mostrati nel secondo summary delle Tabelle 38 e 39, evidenziano che nessun valore medio, associato a ciascun dei due raggruppamenti in cui è stato suddiviso il campione iniziale dei siti con $L_{RP} < 283 \text{ m}$, è statisticamente differenti da $0,80 \text{ ms}^{-2}$ per un livello di significatività α fissato al 5%.

In conclusione, l'utilizzo di un valore medio del tasso di accelerazione pari a $0,85 \text{ ms}^{-2}$ o $0,80 \text{ ms}^{-2}$ interpreta discretamente la reale variazione di velocità nella fase di allontanamento - curva sulle strade monitorate, e si presta alla stima del tronco di transizione percorso in accelerazione.

CAPITOLO 5. MODELLI DI PREVISIONE DELLE VELOCITA' OPERATIVE

5.1 Introduzione

La seconda fase del programma di ricerca si è focalizzata sulla calibrazione, taratura e validazione di modelli di previsione delle velocità operative su rettilineo e curva circolare, con l'esclusione di tutte le misure di velocità appartenenti alle zone di transizione individuate nel corso della prima fase. Il parametro da predire è l'85° percentile della distribuzione delle velocità in condizione di flusso libero, strada asciutta, buone condizioni meteorologiche e luce diurna.

I modelli sono stati sviluppati con processo iterativo applicando l'ordinario metodo dei minimi quadrati con regressione multipla non lineare, secondo l'algoritmo di Gauss – Newton, basato sull'espansione in serie di Taylor della funzione proposta.

La calibrazione dei modelli è stata completata con l'ausilio del software “STATISTICA 7” che ha restituito, per ogni tentativo, il coefficiente di determinazione della regressione ed una tabella di riepilogo delle principali informazioni statistiche, dettagliatamente illustrate al § 4.4, relative alle variabili introdotte.

I modelli confermano la dipendenza delle velocità dalle caratteristiche geometriche e non geometriche dei tracciati stradali. Sono stati sviluppati, in particolare, quattro differenti modelli di previsione delle velocità operative che restituiscono, per senso di marcia, una stima della V_{85} in ogni generica sezione stradale: due per i rettilinei, rispettivamente con sviluppo inferiore e superiore a 500 metri, e due per gli elementi curvilinei circolari, rispettivamente per curve appartenenti a tronchi geometrici stradali con un tasso di variazione medio di curvatura maggiore e minore di 240 gon/km.

Per caratterizzare, tuttavia, la qualità del risultato restituito dal modello di previsione, è stato indispensabile associare al misurando V_{85} un grado di incertezza indiretta, indotto dalla propagazione dell'indeterminatezza di cui sono affette le variabili d'ingresso sulla grandezza d'uscita.

L'incertezza stimata è di tipo composta ed è stata valutata con una procedura di agevole comprensione ed applicazione ripresa dalla UNI CEI ENV 13005 [32].

I modelli sono stati, in seguito, validati su due strade extraurbane ad unica carreggiata non appartenenti al campione di calibrazione ma dotate di caratteristiche geometriche, funzionali e di traffico assimilabili alle prime. La procedura è stata accompagnata dalla valutazione di tre indicatori statistici sintetici che hanno confermato

la potenzialità delle equazioni di regressione che con un ridotto margine di errore riproducono, nel complesso, le reali velocità attinte dagli utenti.

5.2 Modelli di previsione della V_{85} in rettilifo

In letteratura è proposta una distinzione, in fase sperimentale, tra rettilifo “dipendente” ed “indipendente”. Se il rettilifo interposto tra due curve circolari, in assenza di clotoidi di transizione, è poco sviluppato, si presenta del tutto ininfluenza sulle variazioni di velocità degli utenti nella fase di uscita e/o ingresso in curva ed è causa di una velocità di marcia non costante; in questo caso il rettilifo è detto “dipendente”, essendo strettamente influenzato dalla sua estensione e dalle condizioni geometriche al contorno. Egualmente, quando i tracciati sono tortuosi o presentano una serie di successive curve e controcurve, l’inserimento nell’elemento curvilineo circolare avviene con decelerazioni contenute, giacché la velocità è condizionata dalla tortuosità del tratto immediatamente precedente. In queste situazioni, le caratteristiche della prima curva influiscono sulla velocità con la quale è percorsa quella successiva, essendo lo sviluppo del rettilineo interposto breve.

Al contrario, quando il rettilifo ha un’estensione notevole, gli utenti tendono a sviluppare su di esso la maggior parte delle variazioni di velocità in allontanamento e/o in avvicinamento curva; in questo caso il rettilifo è classificato “indipendente” e in condizioni di flusso ininterrotto ed assenza di altri condizionamenti, l’utente può attingere, almeno in linea teorica, la velocità desiderata.

La valutazione della dipendenza o indipendenza di un rettilifo è stata condotta, nel caso della ricerca in esame, con riferimento a ciascuna coppia di curve. E’ stata definita mediante il tracciamento delle velocità operative misurate, la reale distanza di transizione impegnata dall’utente nelle manovre d’ingresso - curva ed allontanamento - curva, come ampiamente trattato nel corso del Capitolo precedente.

La determinazione dei tronchi L_d e L_a per ciascun elemento curvilineo circolare ha consentito fissare un “valore di soglia” – tutt’altro che semplice – alla lunghezza dei rettifili, al di sotto del quale era possibile considerarli dipendenti.

Dall’analisi dei profili di velocità operativa tracciati sulle sei strade extraurbane, adoperate nella fase di analisi del comportamento di guida degli utenti lungo le transizioni, è derivata la suddivisione dei rettifili in due macro - insiemi: il primo raggruppa tutti gli elementi con estensione maggiore di 500 metri (*rettifili indipendenti*), mentre il secondo riunisce gli elementi con estensione minore o uguale a 500 metri (*rettifili dipendenti*).

I due modelli predittivi della V_{85} sono stati calibrati rispettando le seguenti prescrizioni sul database:

- Le misure di velocità adoperate appartengono a sezioni non ricadenti sulle intersezioni
- Le misure di velocità adoperate appartengono a sezioni non ricadenti nelle zone di transizione individuate nel Capitolo 4
- Le misure di velocità adoperate includono quelle relative ad elementi curvilinei circolari con raggio superiore a 500 m

La fase di calibrazione del modello predittivo della V_{85} sui rettifili, con sviluppo superiore a 500 m, è stata preceduta da un controllo statistico delle misure utili di velocità relative alle 104 sezioni adoperate, attraverso il metodo delle 3σ .

La carta di Controllo in Figura 32 non evidenzia anomalie nella distribuzione delle V_{85} rilevate, sulle 104 sezioni geometriche monitorate, ricadenti totalmente nella fascia $[\mu - 3\sigma; \mu + 2\sigma] = [50,46 \text{ km/h}; 95,53 \text{ km/h}]$. In particolare, è possibile osservare come più della metà del campione esaminato, pari al 67% delle misure, ricada nel range $[\mu - \sigma; \mu + \sigma] = [68,49 \text{ km/h}; 86,51 \text{ km/h}]$, dove il massimo scostamento dal valore medio rilevato della V_{85} è pari a $86,00 \text{ km/h} - 77,50 \text{ km/h} = 8,50 \text{ km/h}$, considerato più che ammissibile, ed il 98% nella fascia $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma] = [59,48 \text{ km/h}; 95,53 \text{ km/h}]$, dove il massimo scostamento dal valore medio è di $95,00 \text{ km/h} - 77,50 \text{ km/h} = 17,50 \text{ km/h}$.

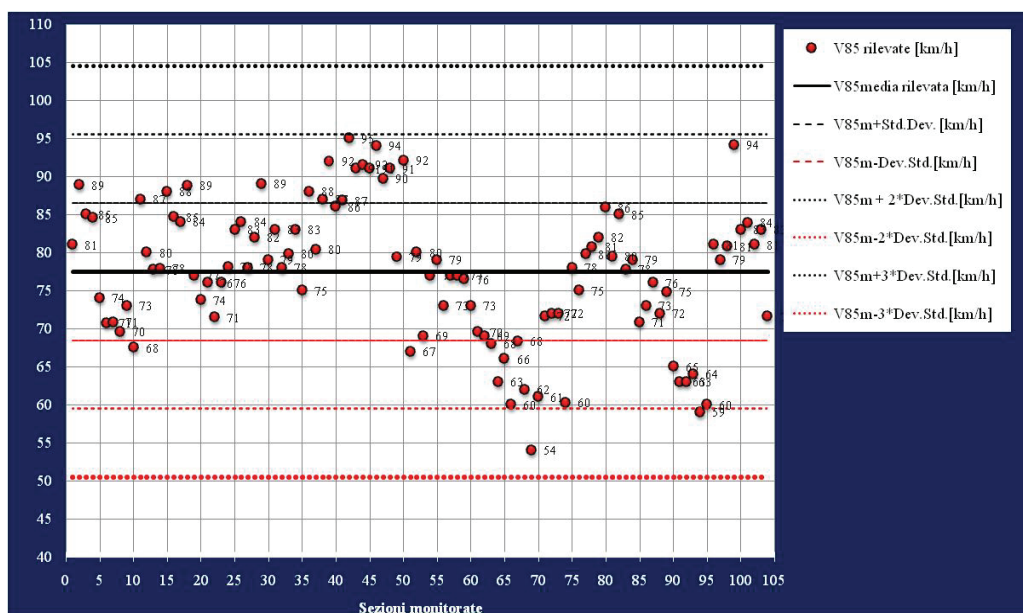


Figura 32_Carta di Controllo Statistico delle V_{85} rilevate su rettifili con $L > 500 \text{ m}$

Il modello di previsione della V_{85} , in km/h, per rettifili con sviluppo maggiore di 500 metri, presenta la seguente espressione (37) con un coefficiente di determinazione pari al 70%:

$$V_{85} = 68,59 + 4,7 \cdot 10^{-3} L + 1,3 \cdot 10^{-2} R_{CP}^{\frac{3}{2}} - 0,29 R_{CP} + 0,563 DAC - 5,63 INT + 0,318 V_{85_CP} \quad (37)$$

dove

L = Sviluppo totale del rettifilo, in metri

R_{CP} = Raggio dell'elemento curvilineo circolare che precede il rettifilo, in metri

DAC = Densità di accessi per chilometro

INT = Variabile binaria pari ad 1 se la sezione dista al più 150m da una intersezione limitrofa, 0 in altro caso

V_{85_CP} = Velocità operativa sulla curva circolare che precede il rettifilo, stimata attraverso modelli di previsione o rilevata in sito, in km/h

Le caratteristiche statistiche delle variabili indipendenti sono illustrate nel summary restituito dal programma in Tabella 40, dove è confermato, dal risultato del t -test, che ciascun coefficiente è statisticamente differente da zero per un p -level inferiore al 5%.

Tabella 40 Statistica del Modello di previsione della V_{85} su rettifili con $L > 500$ m

Model is: $v14=a0+a1*v12+a2*v8^{(1.5)}+a3*v8+a4*v11+a5*v15+a6*v16$ Dep. Var. : V_{85} [km/h] Level of confidence: 95.0% ($\alpha=0.050$)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 97	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	68,59383	3,632645	18,88261	0,000000	61,38404	75,80363
a1	0,00470	0,000410	11,44487	0,000000	0,00388	0,00551
a2	0,01354	0,002435	5,56209	0,000000	0,00871	0,01837
a3	-0,28879	0,053798	-5,36798	0,000001	-0,39556	-0,18201
a4	0,31838	0,044108	7,21833	0,000000	0,23084	0,40592
a5	-5,62875	1,333775	-4,22017	0,000055	-8,27593	-2,98158
a6	-0,56333	0,154986	-3,63473	0,000447	-0,87093	-0,25573

Il diagramma di Performance del modello (37), illustrato in Figura 33, ne evidenzia la potenzialità nell'interpretare correttamente il fenomeno osservato.

I valori di velocità operativa (V_{85}), predetta e rilevata, riportano uno scarto, visivamente, molto ridotto.

La nube dei punti, fittamente distribuita intorno alla bisettrice del primo quadrante, evidenzia una corretta taratura del modello, rivelando una marcata simmetria nella posizione dei valori.

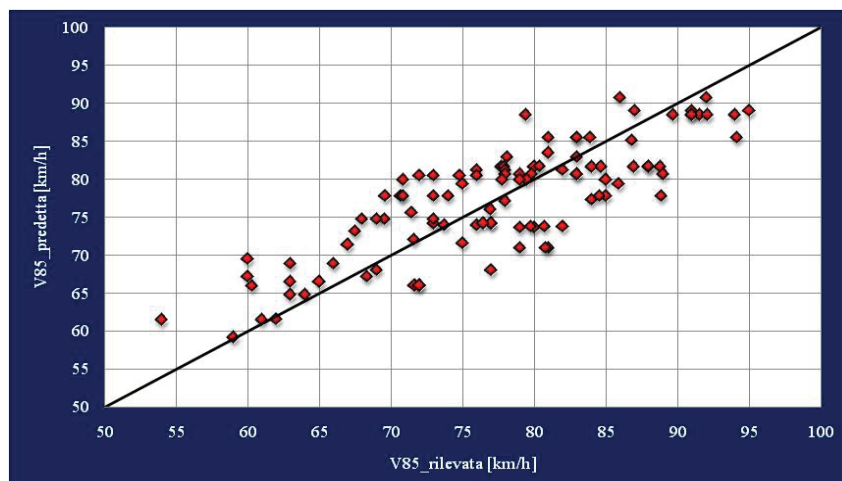


Figura 33_Diagramma di Performance del Modello (37) per rettifili con $L > 500$ m

La fase di calibrazione del modello di previsione della V_{85} sui rettifili con sviluppo inferiore a 500 m è stata preceduta da un controllo statistico con il metodo delle 3σ delle 34 misure utili adoperate. La Carta di Controllo in Figura 34 non evidenzia anomalie nella distribuzione delle velocità operative rilevate, ricadendo totalmente nella fascia $[\mu - 2\sigma; \mu + 3\sigma] = [52,24 \text{ km/h}; 93,05 \text{ km/h}]$.

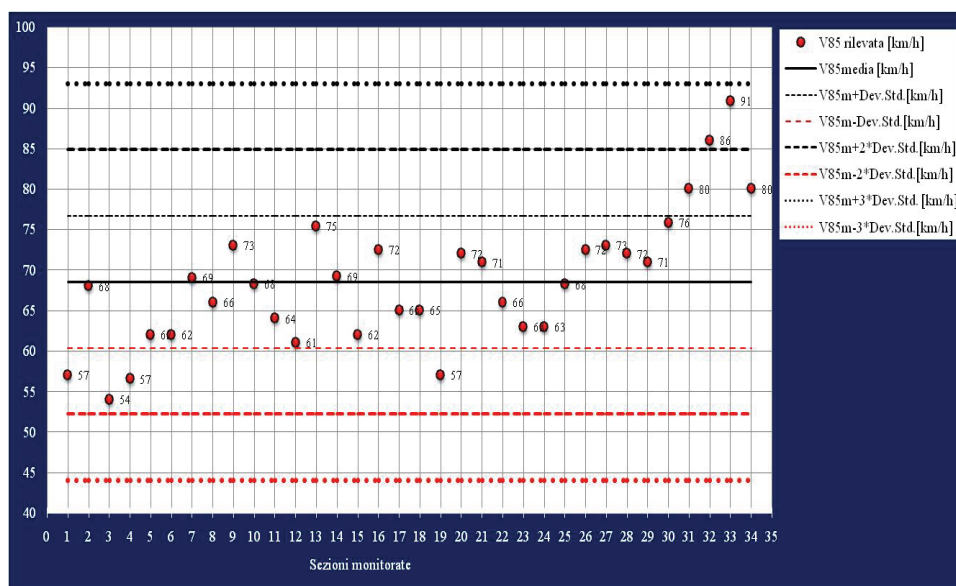


Figura 34_Carta di Controllo Statistico delle V_{85} rilevate su rettifili con $L < 500$ m

In particolare, è possibile osservare come più della metà del campione esaminato, pari al 76% delle misure, ricada nel range $[\mu - \sigma; \mu + \sigma] = [60,40 \text{ km/h}; 76,72 \text{ km/h}]$, dove il massimo scostamento dal valore medio rilevato è pari a $76,00 \text{ km/h} - 68,56 \text{ km/h} = 7,44 \text{ km/h}$, considerato più che ammissibile, ed il 94% nella fascia

$[\mu - 2 \sigma; \mu + 2 \sigma] = [52,24 \text{ km/h}; 84,89 \text{ km/h}]$, dove il massimo scarto dal valore medio è di $80,00 \text{ km/h} - 68,56 \text{ km/h} = 11,44 \text{ km/h}$.

Il modello di previsione della V_{85} , in km/h, sui rettifili con sviluppo minore di 500 metri, presenta la seguente espressione (38) con coefficiente di determinazione pari al 79%:

$$V_{85} = 49,00 + 3,1 \cdot 10^{-4} R_{CP}^2 - 0,14 R_{CP} + 0,02 D - 6,64 INT + 0,493 V_{85_CP} \quad (38)$$

dove

D = distanza della sezione esaminata in rettilineo dalla curva che precede, in metri

Le caratteristiche statistiche delle variabili indipendenti sono illustrate nel summary in Tabella 41, dove è evidente che ciascun coefficiente è statisticamente differente da zero per un p -level inferiore al 5%.

Model is: $V14 = a0 + a1 \cdot v8^2 + a2 \cdot v8 + a3 \cdot v5 + a4 \cdot v15 + a5 \cdot v11$ Dep. Var. : $V85$ [km/h] Level of confidence: 95.0% ($\alpha=0.050$)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 28	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	48,99642	3,899971	12,56328	0,000000	41,0077	56,98515
a1	0,00031	0,000051	5,97631	0,000002	0,0002	0,00041
a2	-0,14394	0,027593	-5,21648	0,000015	-0,2005	-0,08742
a3	0,01955	0,006364	3,07209	0,004696	0,0065	0,03259
a4	-6,63723	1,697579	-3,90982	0,000535	-10,1146	-3,15989
a5	0,49286	0,089322	5,51774	0,000007	0,3099	0,67583

Tabella 41_ Statistica del Modello di previsione della V_{85} su rettifili con $L < 500$ m

Il diagramma di Performance del modello (38) è presentato in Figura 35.

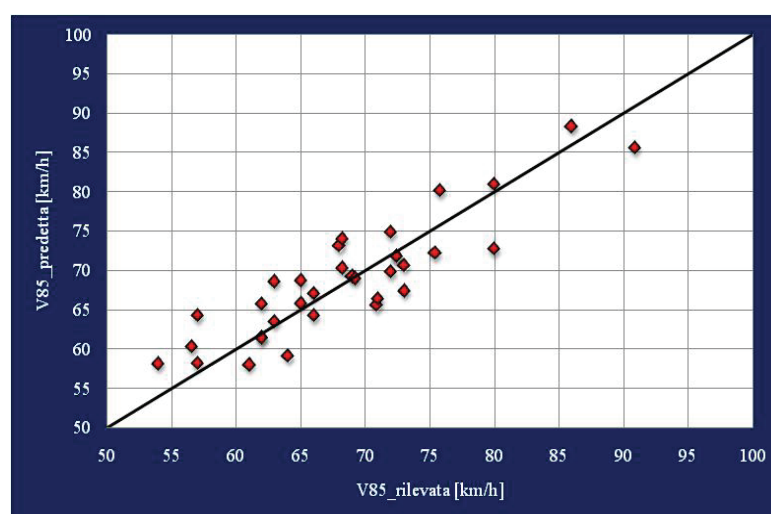


Figura 35_ Diagramma di Performance del Modello (38) per rettifili con $L < 500$ m

La performance del modello predittivo (38) è evidenziata dalla fitta distribuzione dei punti intorno alla bisettrice del primo quadrante; le misure di velocità si predispongono pressoché simmetricamente rispetto alla retta $y = x$.

I valori di velocità operativa (V_{85}), predetta e rilevata, riportano uno scarto, visivamente, molto ridotto.

5.3 Modelli di previsione della V_{85} su elementi curvilinei circolari

La calibrazione del modello di previsione della V_{85} su curve circolari con $CCR > 240$ gon/km è stata preceduta da un controllo statistico delle 43 misure utili adoperate. La Carta di Controllo in Figura 36 non evidenzia anomalie nella distribuzione delle velocità operative rilevate, ricadendo totalmente nella fascia $[\mu - 2\sigma; \mu + 3\sigma] = [37,33 \text{ km/h}; 70,04 \text{ km/h}]$.

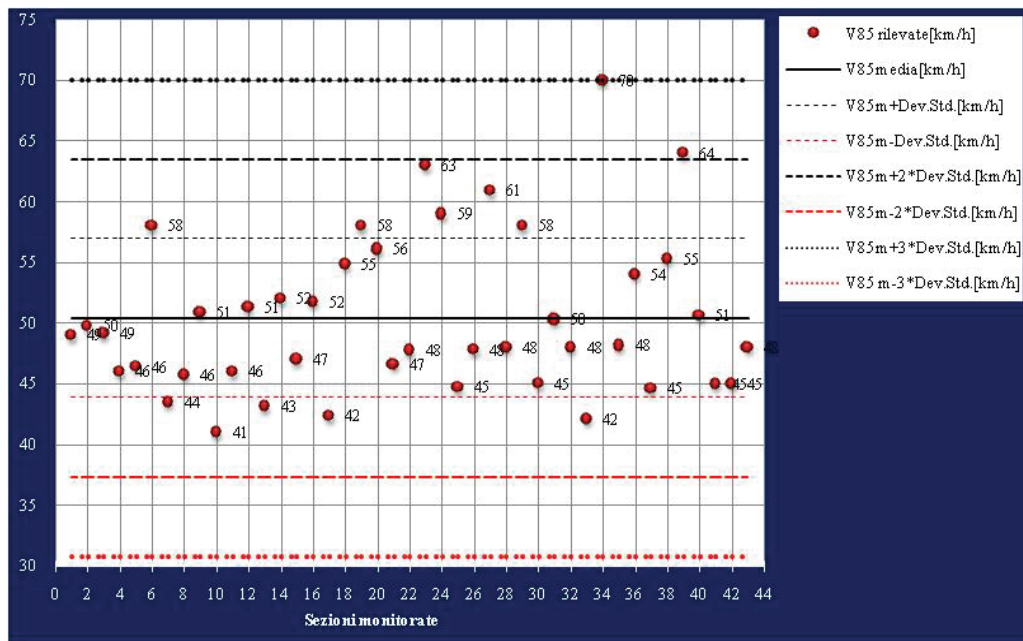


Figura 36_Carta di Controllo Statistico delle V_{85} su curve con $CCR > 240$ gon/km

In particolare, è possibile osservare come più della metà del campione esaminato, pari al 70% delle misure, ricada nel range $[\mu - \sigma; \mu + \sigma] = [43,87 \text{ km/h}; 56,96 \text{ km/h}]$, dove il massimo scostamento dal valore medio rilevato è pari a $56,00 \text{ km/h} - 50,41 \text{ km/h} = 5,59 \text{ km/h}$, considerato più che ammissibile, ed il 95% nella fascia $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma] = [37,33 \text{ km/h}; 63,50 \text{ km/h}]$, dove il massimo scarto dal valore medio è di $63,00 \text{ km/h} - 50,41 \text{ km/h} = 12,59 \text{ km/h}$.

Il modello di previsione della V_{85} , in km/h, su curve con un tasso di variazione medio di curvatura del tronco omogeneo maggiore di 240 gon/km, al quale la curva appartiene, presenta la seguente espressione (39) con un coefficiente di determinazione pari al 72%:

$$V_{85} = 54,00 + 0,29 \cdot Largh_{carr}^2 - 0,026 CCR_s + 10^{-5} CCR_s^2 - 0,80 DAC - 2,68 INT + 0,12 R_{cp} - 4,5 \cdot 10^{-4} R_{cp} \quad (39)$$

dove

$Largh_{carr}$ = *Larghezza carreggiata (corsie con banchine)*, in metri

$CCRs$ = *Tasso di variazione di curvatura del singolo elemento curvilineo circolare*, in gon/km

R_{CP} = *Raggio della curva che precede l'elemento curvilineo circolare*, in metri

Le caratteristiche statistiche delle variabili indipendenti sono illustrate nel summary in Tabella 42, dove è mostrato che ciascun coefficiente è statisticamente differente da zero per un *p-level* inferiore al 5%.

Model is: $v4=a0+a1*v9^2+a2*v6+a3*v6^2+a4*v14+a5*v13+a6*v7+a7*v7^2$ Dep. Var. : $V85$ [km/h] Level of confidence: 95.0% ($\alpha=0.050$)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 35	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	54,00602	5,932398	0,00	0,00	41,96262	66,04943
a1	0,29490	0,111940	0,00	0,00	0,06765	0,52215
a2	-0,02576	0,008861	0,00	0,00	-0,04375	-0,00778
a3	0,00001	0,000000	0,00	0,00	0,00001	0,00001
a4	-0,80047	0,355689	0,00	0,00	-1,52255	-0,07838
a5	-2,68020	1,620847	0,00	0,00	-5,97069	0,61030
a6	0,12472	0,043619	0,00	0,00	0,03617	0,21327
a7	-0,00045	0,000158	0,00	0,00	-0,00077	-0,00013

Tabella 42_ Statistica del Modello di previsione della V_{85} su curve con $CCR_m > 240$ gon/km

Il diagramma di Performance del modello (39) è presentato in Figura 37.

Il grafico fa risaltare la potenzialità dell'espressione analitica tarata, per la previsione della V_{85} su curve circolari con $CCR_m > 240$ gon/km; infatti, la nube di punti, densamente sistemata intorno alla bisettrice del primo quadrante, evidenzia la capacità del modello di interpretare correttamente il fenomeno reale.

Le misure di velocità si distribuiscono, difatti, pressoché simmetricamente rispetto alla retta $y = x$, denotando che le misure di velocità (V_{85}), predette e rilevate, restituiscono uno scarto, visivamente, molto ridotto.

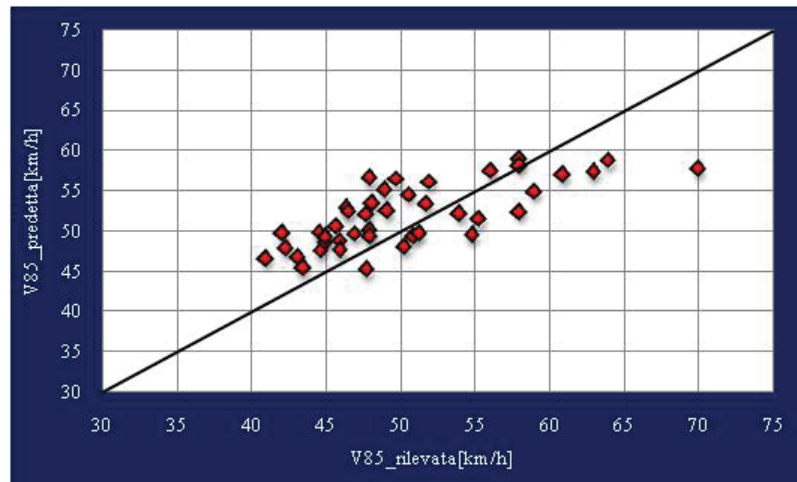


Figura 37_Diagramma di Performance del Modello (39) per curve con $CCR_m > 240$ gon/km

La calibrazione del modello di previsione della V_{85} , su curve circolari con $CCR < 240$ gon/km, è stata anticipata da un controllo statistico delle 51 misure utili adoperate.

La Carta di Controllo in Figura 38 non evidenzia anomalie nella distribuzione delle velocità operative rilevate, ricadendo totalmente nella fascia $[\mu - 3\sigma; \mu + 2\sigma] = [25,85 \text{ km/h}; 85,51 \text{ km/h}]$.

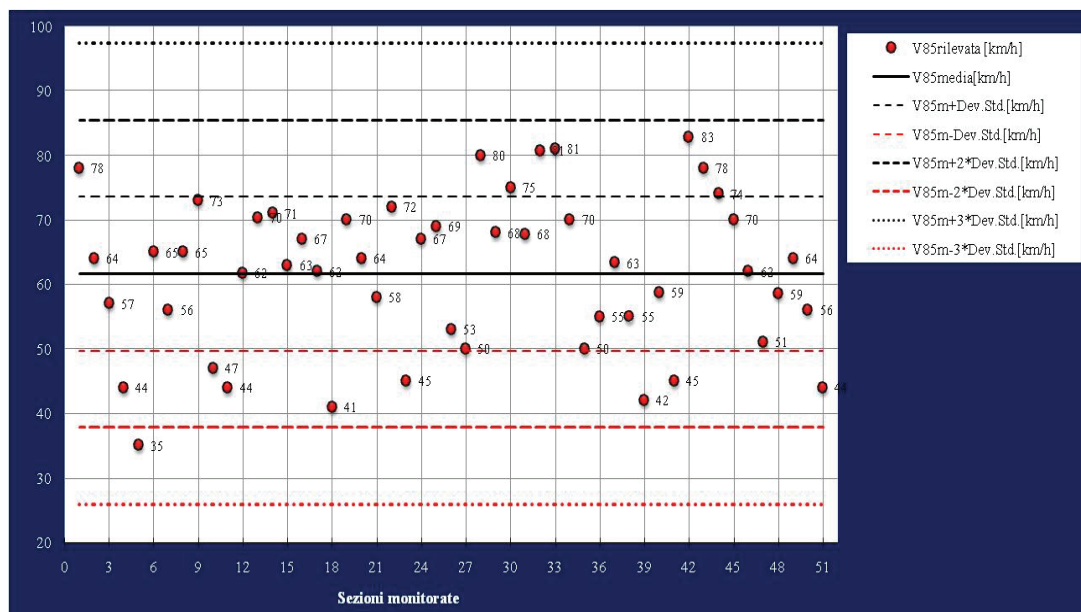


Figura 38_Carta di Controllo Statistico delle V_{85} su curve con $CCR < 240$ gon/km

In particolare, è possibile osservare come più della metà del campione esaminato, pari al 67% delle misure, ricada nel range $[\mu - \sigma; \mu + \sigma] = [49,71 \text{ km/h}; 73,58 \text{ km/h}]$, dove il massimo scostamento dal valore medio rilevato è pari a 73,00

km/h - 61,65 km/h = 11,35 km/h, considerato più che ammissibile, mentre il 98% nella fascia $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma] = [37,78 \text{ km/h}; 85,51 \text{ km/h}]$, dove il massimo scarto dal valore medio è di 83,00 km/h - 61,65 km/h = 21,37 km/h.

Il modello di previsione della V_{85} , in km/h, su curve con un tasso di variazione medio di curvatura del tronco omogeneo, al quale la curva appartiene, minore di 240 gon/km, presenta la seguente espressione (40) con un coefficiente di determinazione pari al 81%:

$$V_{85} = 55,88 + 5,54 \cdot L_{\text{argh}_{\text{carr}}} - 0,038 CCR_m + 10^{-5} CCR_m^2 - 0,030 L - 0,51 DAC - 4,64 INT + 7,3 \cdot 10^{-4} L_{RP} - 0,063 CCR_m \quad (40)$$

dove

L = Sviluppo dell'elemento curvilineo circolare, in metri

L_{RP} = Sviluppo del rettifilo precedente, in metri

CCR_m = Tasso di variazione medio di curvatura del tronco omogeneo al quale la curva appartiene, in gon/km

Le caratteristiche statistiche delle variabili indipendenti, introdotte nel modello in Tabella 43, mostrano che ciascun coefficiente è statisticamente differente da zero con un p -level inferiore al 5%.

Model is: v11=a0+a1*v4+a2*v5+a3*v5^2+a4*v6+a5*v7+a6*v8+a7*v9+a8*v10 Dep. Var. : V85 reale Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 42	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	55,88322	10,85714	0,00	0,00	33,97262	77,79382
a1	5,53285	1,87796	0,00	0,00	1,74298	9,32271
a2	-0,03836	0,01192	0,00	0,00	-0,06241	-0,01430
a3	0,00001	0,00000	0,00	0,00	0,00001	0,00001
a4	-0,03005	0,02379	0,00	0,00	-0,07807	0,01797
a5	-0,50864	0,15145	0,00	0,00	-0,81428	-0,20299
a6	-4,64792	1,81882	0,00	0,00	-8,31844	-0,97740
a7	0,00073	0,00114	0,00	0,00	-0,00156	0,00303
a8	-0,06335	0,01357	0,00	0,00	-0,09075	-0,03596

Tabella 43_ Statistica del Modello di previsione della V_{85} su curve con $CCR_m < 240$ gon/km

Il diagramma di Performance del modello (40) è presentato in Figura 39.

Il grafico evidenzia la capacità del modello di interpretare correttamente il fenomeno.

I punti, addensandosi intorno alla bisettrice del primo quadrante, in posizione pressoché simmetrica, consentono di minimizzare lo scarto tra misura di velocità predetta ed osservata.

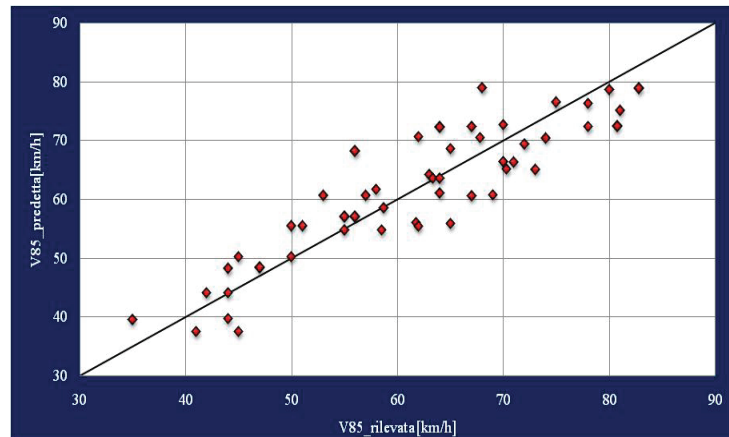


Figura 39_Diagramma di Performance del Modello per curve con $CCR_m < 240$ gon/km

5.4 Stima dell'incertezza del misurando V_{85}

L'obiettivo di una misurazione, di una prova, di una sperimentazione qualsiasi è quello di determinare il valore del *misurando*, in altre parole della *grandezza da misurare*, in maniera diretta oppure indiretta. In generale il risultato di una sperimentazione è solamente un'approssimazione o una stima del valore vero che inevitabilmente è affetto da *incertezza*; da una grandezza aleatoria, quindi, possono derivare differenti determinazioni.

La variabile dipendente V_{85} , stimata indirettamente con uno dei quattro modelli calibrati al variare delle condizioni geometriche correnti, è inevitabilmente affetta, come ogni grandezza derivante da sperimentazione, da un errore prodotto dall'incertezza delle variabili indipendenti al secondo membro.

Un risultato di una sperimentazione, per essere utilizzabile, richiede un'indicazione quantitativa della sua attendibilità e qualità. Senza tale indicazione, infatti, i risultati non possono essere confrontati né tra di loro, né con valori di riferimento assegnati da specifiche norme. Tale indicazione si esprime in termini d'incertezza del risultato di una misura.

È necessario che esista una procedura, di agevole comprensione ed applicazione, per caratterizzare la qualità del risultato di una misurazione.

L'incertezza di misura è definita da norme internazionali, e recepita dagli istituti di formazione nazionali. La più recente versione della norma internazionale pubblicata in Italia è la *UNI CEI ENV 13005 "Guida all'espressione dell'incertezza di misura"*, (traduzione italiana della norma internazionale ISO ENV 13005 "*Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*") [32].

Le incertezze possono essere associate a vari fattori tra cui i seguenti:

- a) definizione incompleta del misurando
- b) imperfetta realizzazione della definizione del misurando
- c) non rappresentatività del campione
- d) inadeguata conoscenza degli effetti e delle variabili esterne che possono influenzare il processo di previsione della grandezza
- e) errori di misurazione sistematici
- f) risoluzione o soglia di risoluzione strumentali non infinite
- g) valori non esatti di costanti ed altri parametri ottenuti da fonti esterne ed usati nell'algoritmo di elaborazione dei dati
- h) approssimazioni ed ipotesi semplificatrici inerenti il metodo ed il procedimento sperimentale
- i) variazioni delle condizioni apparentemente identiche

La definizione formale del termine “incertezza di misura”, senza alcun riferimento a particolari tipologie di prove, esperimenti, misurazioni, ricerche, presentata nella “*Guida all'espressione dell'incertezza di misura*” (UNI CEI ENV 13005), è la seguente: “*parametro, associato al risultato di una misurazione, che caratterizza la dispersione dei valori ragionevolmente attribuibili al misurando*”.

L'incertezza descrive completamente “la qualità” della grandezza stimata.

Secondo le raccomandazioni degli organismi internazionali competenti, la valutazione dell'*incertezza tipo* può essere di categoria *A* e *B* in base al metodo utilizzato: può essere adottato un approccio di tipo *A*, quando una grandezza *X* è stimabile direttamente, in modo sperimentale, ad esempio in laboratorio o attraverso la ripetizione di un processo di misurazione in condizioni controllate, oppure se la stima della grandezza d'ingresso non è ricavabile dalle osservazioni ripetute, l'incertezza deve essere stimata con metodi di categoria *B* attraverso un giudizio scientifico di tutte le informazioni utili sulla possibile variabilità di *X*.

Le informazioni necessarie per la stima dell'incertezza con approccio *B* includono:

- a) dati di precedenti elaborazioni e sperimentazioni
- b) esperienza o conoscenza generale del fenomeno e degli strumenti di rilievo e d'analisi
- c) dati forniti in certificati di taratura o rapporti simili
- d) incertezze assegnate ai valori di riferimento presi da manuali

Il corretto uso delle informazioni disponibili per la valutazione dell'*incertezza tipo* di categoria *B* richiede, pertanto, intuizione basata sull'esperienza e sulla conoscenza generale dello specifico problema di misura da affrontare.

Entrambi i tipi di valutazione sono basati su distribuzioni di probabilità e le componenti, risultanti da ambedue i metodi, sono quantificate mediante varianza o scarto tipo.

5.4.1 Valutazione dell'Incertezza tipo composta

Spesso la grandezza da stimare \mathbf{Y} non è valutabile direttamente ma solo attraverso una serie osservazioni di un certo numero N di grandezze X_i ($i = 1, \dots, N$) (misura indiretta), dalle quali lo stesso misurando dipende attraverso la relazione funzionale (41)

$$\mathbf{Y} = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (41)$$

Tale relazione è detta equazione di misura. La funzione f non è l'espressione di una legge fisica ma descrive matematicamente un intero processo di sperimentazione. Essa deve contenere tutte le possibili variabili indipendenti che contribuiscono, in modo significativo, a spiegare il fenomeno e, quindi, l'incertezza globale di una variabile dipendente.

Secondo la terminologia adottata, le grandezze osservate X_i , ossia le variabili indipendenti della (41), sono le *grandezze d'ingresso*, e la \mathbf{Y} , variabile dipendente, è la grandezza d'uscita o misurando. Poiché ciascuna grandezza d'ingresso X_i è una variabile aleatoria, la grandezza di uscita \mathbf{Y} sarà anch'essa una variabile aleatoria.

E' dimostrato che se tutte le stime delle singole variabili aleatorie, \bar{x}_i , sono indistorte, la stima, \bar{y} , della variabile aleatoria \mathbf{Y} si ottiene applicando *l'equazione di misura* (42) alle stime delle grandezze d'ingresso:

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) \quad (42)$$

L'incertezza associata a \mathbf{Y} prende il nome di *incertezza tipo composta*, $u(y)$.

L'incertezza tipo composta è calcolata considerando le *incertezze tipo* di tutte le grandezze d'ingresso. La norma definisce la "*legge di propagazione dell'incertezza*" che consente di valutare l'incertezza di cui è affetta la variabile d'uscita a partire dalle incertezze dei dati in ingresso; essa, come viene riportata di seguito, è applicabile solo se l'equazione di misura non presenta forti non linearità.

La stima, pertanto, del grado d'indeterminatezza, di cui è affetto il misurando V_{85} , acquisito con l'applicazione di uno dei quattro modelli calibrati, è conseguibile attraverso un processo di valutazione di tipo composto. La variabile d'uscita dei modelli è determinabile attraverso l'acquisizione delle grandezze al secondo membro delle espressioni (37) (38) (39) (40). A ciascun modello è stata, pertanto, abbinata una stima dell'incertezza composta associata al valore medio.

5.4.1.1 Propagazione dell'incertezza per grandezze non correlate

Si consideri l'equazione (41); se tutte le stime delle grandezze X_i sono indipendenti, l'incertezza tipo composta del valore misurato y può essere ricavata secondo la seguente legge di propagazione per grandezze non correlate:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2} \cdot u^2(x_i) \quad (43)$$

dove

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) = \text{Derivate parziali della funzione, che descrive il fenomeno, rispetto a ciascuna}$$

variabile indipendente introdotta nel modello

$$u(x_i) = \text{Scarto tipo sperimentale della media pari a } \frac{s_x}{\sqrt{N}}; \text{ con } s_x \text{ si indica la deviazione}$$

standard campionaria, mentre con N il numero di determinazioni per la generica variabile X

Le derivate parziali sono definite *coefficienti di sensibilità*; essi descrivono, in particolare, come la stima della variabile d'uscita y possa subire trasformazioni al variare dei valori delle variabili d'ingresso.

I coefficienti di sensibilità, pertanto, descrivono quanto una variazione nella stima d'ingresso x_i influenza la stima d'uscita y , cioè quanto questa è “sensibile” alla trasformazione della stima d'ingresso in questione. Essi sono dunque i pesi, in senso statistico, che sono attribuiti alle incertezze tipo d'ingresso per formare l'incertezza tipo composta. La valutazione dei coefficienti di sensibilità richiede il calcolo delle derivate parziali della funzione f ; questo è agevole per le funzioni semplici, ma può rappresentare un ostacolo per modelli più complicati.

Nel caso di non forti linearità, è possibile linearizzare la funzione. Quando, invece, sussistono casi, in cui la complessità del modello rende sconsigliabile la determinazione analitica dei coefficienti, conviene determinarli per via numerica, “perturbando” la funzione con una variazione, positiva e negativa, pari all’incertezza tipo di ciascuna stima d’ingresso, mantenendo invariate tutte le altre.

5.4.1.2 Propagazione dell’incertezza per grandezze correlate

Spesso le variabili indipendenti adottate per descrivere un fenomeno, nel caso in esame coincidente con la calibrazione di un modello, non sono tra loro indipendenti. Ciò corrisponde ad affermare che la matrice di correlazione, in cui ogni elemento riproduce la covarianza tra le possibili coppie di variabili impiegate, è non nulla.

Le grandezze possono ritenersi correlate quando interviene, per esempio, nella stima della loro determinazione lo stesso strumento, lo stesso campione di misura, le medesime condizioni ambientali, di traffico ed infrastrutturali, oppure quando ci si riferisce allo stesso sito d’analisi. In questo caso l’espressione (43) non è adoperabile; al si utilizza l’equazione generale (44) dove intervengono le correlazioni esistenti tra le grandezze d’ingresso:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot (u^2(x_i)) + 2 \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot \text{Cov}(x_i, x_j)} \quad (44)$$

dove

$\text{Cov}(x_i, x_j) = \text{Covarianza della coppia di variabili } (X_i; X_j) \text{ delle quali si conoscono una serie di determinazioni } [x_i; x_j]$

In conclusione, è possibile affermare che la procedura utilizzata, per stimare l’incertezza tipo composta della grandezza d’uscita del modello, segue la legge di propagazione dell’indeterminatezza per grandezze correlate. Le variabili, disposte al secondo membro dei quattro modelli tarati, si presentano correlate come ben illustrato anche dagli elaborati numerici allegati in Appendice B.

L’espressione (44), in realtà, non restituisce, per nessuno dei quattro modelli predittivi della V_{85} , i risultati auspicati; infatti, ogni espressione analitica raccoglie al suo interno almeno una variabile di ordine superiore alla prima potenza. Applicando la (44), l’incertezza desiderata assumerebbe non un carattere numerico bensì alfanumerico, per via delle derivate parziali da trattare.

Nella pratica, per risolvere il problema, la funzione, sebbene non rigorosamente lineare ma differente poco da una lineare, è sostituita, approssimativamente, con una lineare. Ciò è dovuto al fatto che nella maggior parte delle applicazioni pratiche le variazioni aleatorie delle grandezze che vi figurano appaiono come errori insignificanti, “sovrapposti” alla regolarità di base [70]. A causa della relativa piccolezza di questi errori le funzioni, non lineari nel campo di variazione di alcuni argomenti, risultano *quasi lineari* in un campo ristretto delle loro variazioni aleatorie. Infatti, è noto, che ogni funzione continua e derivabile si può approssimativamente sostituire con una funzione lineare (cioè si può linearizzarla) in un dominio sufficientemente ristretto del campo di variazione degli argomenti.

L'errore dovuto alla linearizzazione è tanto più piccolo quanto più sono stretti i limiti di variazione degli argomenti e più vicina sarà la funzione ad una lineare. Se il campo dei valori possibili degli argomenti aleatori è tanto piccolo che in esso la funzione può essere linearizzata, con una precisione sufficiente per le applicazioni pratiche, si può applicare a quest'ultimo l'apparato delle caratteristiche numeriche elaborato per le funzioni lineari.

E' evidente che si avrà una soluzione approssimata del problema ma, nella maggioranza dei casi, non occorre quella esatta [70]. Nelle applicazioni dove i fattori aleatori si manifestano quali perturbazioni insignificanti della regolarità di base, la linearizzazione è sempre possibile.

Nel caso dei modelli predittivi, proposti nel Capitolo precedente, sarà necessario sviluppare in serie di Taylor le quattro funzioni nell'intorno del punto $(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn})$, che definisce l'insieme dei valori medi delle variabili introdotte al secondo membro dei modelli, e conservare solo i termini del primo ordine, eliminando quelli di ordine superiore.

L'espressione (41) si trasforma, pertanto, per ciascun modello nella (45):

$$Y = f(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xN}) + \sum_{i=1}^N f'_{xi}(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xN}) \cdot (X_i - m_{xi}) \quad (45)$$

E' necessario precisare che le funzioni (37) (38) (39) (40) sono tutte continue e derivabili nell'intorno dell'insieme $(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn})$; il modello (37), predittivo della V_{85} sui rettifili con sviluppo superiore a 500 metri, include una variabile (raggio della curva che precede) con esponente pari a $3/2$, ma comunque sono soddisfatti i requisiti per la linearizzazione essendo la variabile definita per valori superiori a zero, dove risulterebbe essere non continua.

5.4.1.2.1 Incertezza tipo composta dei Modelli di previsione della V_{85}

La stima dell'incertezza composta $u_c(y)$, associata al valore medio del misurando Y , restituito dai quattro modelli predittivi e raffigurante la V_{85} , ha richiesto innanzitutto la linearizzazione delle quattro “funzioni” secondo la (45), dopo aver verificato che fossero continue e derivabili in un dominio sufficientemente ristretto del campo di variazione dei valori medi degli argomenti. In seguito è stata applicata l'espressione (44) per la stima dell'incertezza composta associata al valore medio del generico misurando y , in km/h.

Gli elaborati numerici sono riportati in dettaglio in Appendice B; di seguito, si illustra sinteticamente la linearizzazione dei quattro modelli e la stima dell'errore associato al valore medio della V_{85} , in km/h.

Il modello di previsione della V_{85} , in km/h, per i rettifili con sviluppo maggiore di 500 metri, si converte nel processo di linearizzazione dall'espressione (37) alla (46); è ben evidente, dall'espressione numerica del modello linearizzato, che sono assenti potenze di variabili superiore al primo ordine:

$$V_{85} = 68,59 + 4,7 \cdot 10^{-3} L + 1,3 \cdot 10^{-2} R_{CP}^{\frac{3}{2}} - 0,29 R_{CP} + 0,563 DAC - 5,63 INT + 0,318 V_{85_CP} \quad (37)$$

$$V_{85} = 74,5786 - 0,563(DAC - 9,13) - 5,63(INT - 0,19) + 0,32(V_{85_CP} - 59,73) - 0,0093(R_{CP} - 191,01) + 0,0047(L - 2709,32) \quad (46)$$

L'incertezza tipo composta $u_c(y)$ è pari a 3,10 km/h. Il risultato finale, restituito dal modello, è il seguente:

$$V_{85} = V_{85} \pm 3,10 \text{ km/h} \quad (47)$$

Il modello di previsione della V_{85} , in km/h, sui rettifili con sviluppo minore di 500 metri, nel processo di linearizzazione si converte dall'espressione (38) alla (48); il modello linearizzato non presenta variabili con potenze di ordine superiore al primo:

$$V_{85} = 49,00 + 3,1 \cdot 10^{-4} R_{CP}^2 - 0,14 R_{CP} + 0,02 D - 6,64 INT + 0,493 V_{85_CP} \quad (38)$$

$$V_{85} = 63,4948 + 0,493(V_{85_CP} - 52,9) - 6,64(INT - 0,29) + 0,02(D - 257,55) - 0,035(R_{CP} - 169,12) \quad (48)$$

L'incertezza tipo composta $u_c(y)$ è pari a 9,27 km/h. Il risultato finale, restituito dal modello, è il seguente:

$$V_{85} = V_{85} \pm 9,27 \text{ km/h} \quad (49)$$

Il modello di previsione della V_{85} , in km/h, su curve con CCR_m maggiore di 240 gon/km, nel processo di linearizzazione muta dall'espressione (39) alla (50):

$$V_{85} = 54,00 + 0,29 \cdot L \arg h_{carr}^2 - 0,026 CCR_S + 10^{-5} CCR_S^2 - 0,80 DAC - 2,68 INT + 0,12 R_{CP} - 4,5 \cdot 10^{-4} R_{CP} \quad (39)$$

$$V_{85} = 51,091 + 0,053(R_{CP} - 74,42) - 2,68(INT - 0,44) - 0,8(DAC - 4,91) - 0,0081(CCR_S - 897,5) + 3,58(L \arg h_{carr} - 6,17) \quad (50)$$

L'incertezza tipo composta $u_c(y)$ è pari a 2,54 km/h. Il risultato finale, restituito dal modello, è il seguente:

$$V_{85} = V_{85} \pm 2,54 \text{ km/h} \quad (51)$$

Il modello di previsione della V_{85} , in km/h, su curve con CCR_m minore di 240 gon/km, nel processo di linearizzazione si trasforma dall'espressione (40) alla (52)

$$V_{85} = 55,88 + 5,54 \cdot L \arg h_{carr} - 0,038 CCR_S + 10^{-5} CCR_S^2 - 0,030 L - 0,51 DAC - 4,64 INT + 7,3 \cdot 10^{-4} L_{RP} - 0,063 CCR_m \quad (40)$$

$$V_{85} = 60,33 - 0,063(CCR_m - 120,29) + 0,00073(L_{RP} - 526,2) - 4,64(INT - 0,37) - 0,51(DAC - 5,22) + -0,03(L - 73,8) - 0,028(CCR_S - 510,01) + 5,54(L \arg h_{carr} - 6,32) \quad (52)$$

L'incertezza tipo composta $u_c(y)$ è pari a 3,99 km/h. Il risultato finale, restituito dal modello, è il seguente:

$$V_{85} = V_{85} \pm 3,99 \text{ km/h} \quad (53)$$

In nessun caso l'incertezza tipo composta, associata alla velocità operativa predetta, supera i 10 km/h; tale requisito aumenta l'attendibilità e la qualità del risultato restituito dai quattro modelli di previsione della V_{85} .

5.4.2 Incertezza tipo estesa del misurando V_{85}

L'incertezza tipo composta $u_c(y)$ è universalmente usata per esprimere l'incertezza del risultato di una misurazione o di una sperimentazione. In realtà, in alcune applicazioni commerciali, industriali e normative, e là dove sono coinvolte la salute e la sicurezza pubblica, è, sovente, necessario stimare quantitativamente l'incertezza; ciò si realizza con la stima del seguente intervallo (54):

$$[y_m - U(y); y_m + U(y)] \quad (54)$$

L'intervallo (54) è definito intorno alla media dei risultati conseguiti, e raccoglie una gran parte della distribuzione dei valori che ragionevolmente possono attribuirsi al misurando. La valutazione quantitativa supplementare dell'incertezza, che soddisfa il requisito di fornire un intervallo, è denominata incertezza estesa ed è indicata con $U(y)$.

L'incertezza estesa si ricava moltiplicando l'incertezza tipo composta $u_c(y)$ per un fattore di copertura k , secondo la (55):

$$U(y) = k u_c(y) \quad (55)$$

L'intervallo $[y_m - U(y); y_m + U(y)]$ si determina attraverso la conoscenza dell'incertezza estesa $U(y)$ alla quale si accosta un livello di confidenza detto anche *probabilità di copertura*.

Ciò equivale ad affermare che i due estremi dell'intervallo (54), al variare di k , individuano una porzione della distribuzione di probabilità del misurando; nel caso in esame, l'intervallo definisce la probabilità di copertura della distribuzione della variabile dipendente V_{85} , e, quindi, di tutti i valori ad essa attribuibili mediante l'applicazione di uno dei quattro modelli calibrati.

Ciò evidenzia, in ogni caso, anche il massimo grado d'indeterminazione, in km/h, del valore medio della grandezza d'uscita del modello, rispetto ai possibili valori che quest'ultimo può restituire al variare delle caratteristiche d'ingresso.

5.4.2.1 Incertezza estesa dei Modelli di previsione della V_{85} su rettili

E' stata determinata, come richiesto in linea opzionale dalla UNI CEI ENV 13005, l'incertezza estesa $U(y)$, associata al valore medio restituito dai modelli.

E' stato stimato il valore medio della velocità operativa predetta V_{85m} , utilizzando la medesima base campionaria impiegata in fase di calibrazione.

Si è proceduto alla valutazione dell'incertezza estesa, nota quella composta, facendo variare k : in tal modo è stato ottenuto l'intervallo di confidenza del valore medio della V_{85} ricavata secondo le singole espressioni (37) (38) (39) (40).

Le elaborazioni numeriche sono riportate integralmente in Appendice B.

In Figura 40 è presentato il legame, per il modello di previsione della V_{85} su rettili con sviluppo maggiore di 500 m, tra il fattore di copertura k ed il livello di confidenza associato all'intervallo $[V_{85m} - k u_c(y); V_{85m} + k u_c(y)]$.

Il diagramma in Figura 40 mostra che per un fattore di copertura $k = 3$ il livello di confidenza dell'intervallo è pari a 0,68, in quanto l'intervallo $[V_{85m} - 3 \cdot u_c(y); V_{85m} + 3 \cdot u_c(y)] = [68 \text{ km/h}; 87 \text{ km/h}]$ comprende più della metà dei possibili valori di velocità operativa, attribuibili al misurando, e pari al 68% dell'intera distribuzione.

In corrispondenza, invece, del fattore di copertura $k = 4$ il livello di confidenza dell'intervallo è pari a 0,80; l'intervallo $[V_{85m} - 4 \cdot u_c(y); V_{85m} + 4 \cdot u_c(y)] = [65 \text{ km/h}; 90 \text{ km/h}]$ accoglie una dimensione maggiore del campione analizzato, rispetto al caso precedente, pari all'80% della distribuzione.

In Figura 41 è, invece, presentato, per il medesimo modello, il legame tra l'intervallo di confidenza $[V_{85m} - k u_c(y); V_{85m} + k u_c(y)]$ (*probabilità di copertura del misurando*) e l'incertezza estesa $U(y)$, al variare del fattore di copertura k .

Il diagramma in Figura 41 indica che per un fattore di copertura $k = 3$ l'incertezza estesa, abbinata al valore medio restituito dal modello, è di 9,30 km/h, con una copertura del 68% dell'intera distribuzione dei valori. L'incertezza estesa associata a $k = 3$ è tollerabile, presentandosi più della metà del campione compreso nell'intervallo.

In corrispondenza, invece, del fattore di copertura $k = 4$ l'incertezza estesa, associata al valore medio restituito dal modello, è pari a 12,40 km/h, con una copertura dell'80% dell'intera distribuzione dei valori. L'errore ricavato per $k = 4$, nonostante sia

superiore rispetto al caso precedente, risulta essere comunque accettabile giacché un incremento di punti appartenenti all'intervallo definito è stato registrato.

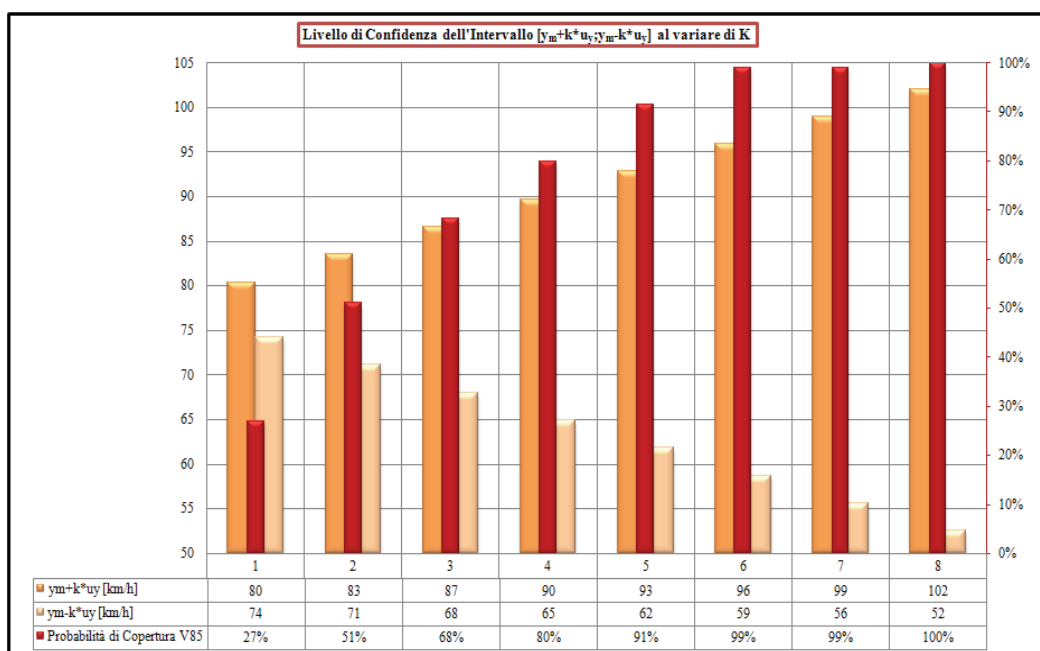


Figura 40_ Legame tra livello di confidenza e k (Modello V_{85} su rettifili con $L > 500$ m)

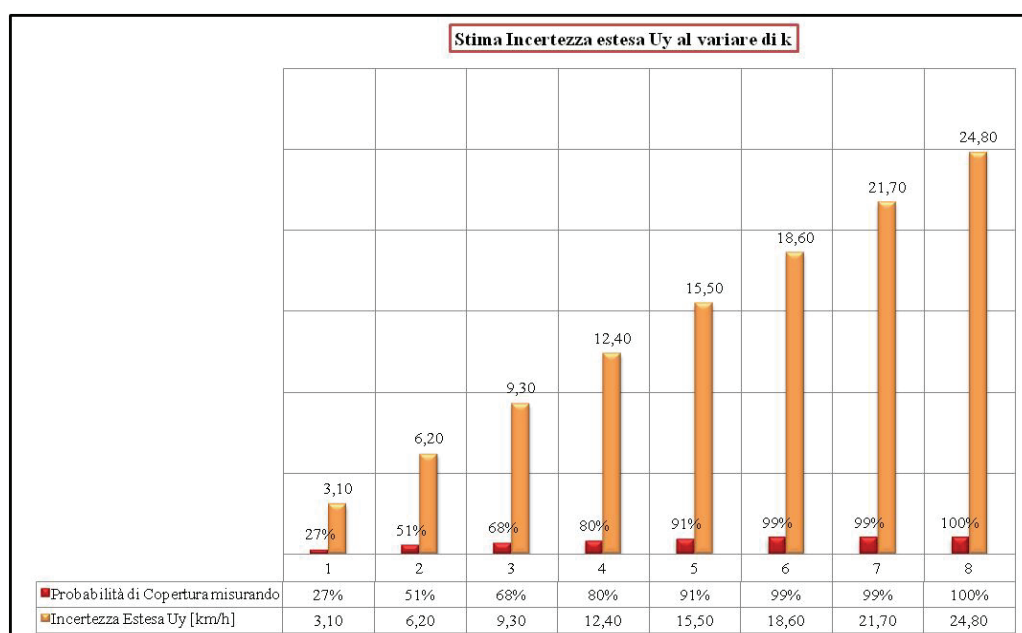


Figura 41_ Legame tra $U(y)$ e k per Modello di previsione V_{85} su rettifili con $L > 500$ m

In Figura 42 è, invece, riportato il legame, per il modello di previsione della V_{85} su rettifili con sviluppo minore di 500 m, tra il fattore di copertura k ed il livello di confidenza associato all'intervallo $[V_{85m} - k u_c(y); V_{85m} + k u_c(y)]$.

Il diagramma evidenzia che per un fattore di copertura $k = 1$ il livello di confidenza dell'intervallo è pari a 0,76, giacché l'intervallo $[V_{85m} - u_c(y); V_{85m} + u_c(y)] = [59 \text{ km/h}; 78 \text{ km/h}]$ comprende più della metà dei possibili valori di velocità operativa, attribuibili al misurando, e pari al 76% dell'intera distribuzione.

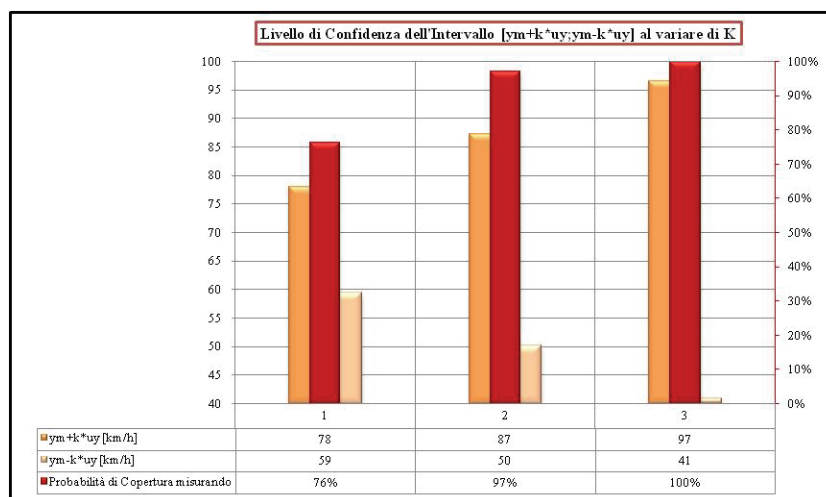


Figura 42_ Legame tra livello di confidenza e k (Modello V_{85} su rettifili con $L < 500$ m)

In Figura 43 è, invece, presentato, per il medesimo modello, il legame tra l'intervallo di confidenza $[V_{85m} - k u_c(y); V_{85m} + k u_c(y)]$ e l'incertezza estesa $U(y)$, al variare del fattore di copertura k . Il diagramma indica che, per un fattore di copertura k pari a 1, l'incertezza estesa, associata al valore medio restituito dal modello, è pari a 9,27 km/h, con una copertura del 76% dell'intera distribuzione delle misure.

La valutazione dell'incertezza estesa per $k = 1$ è da ritenersi ammissibile, essendo più della metà del campione compreso nell'intervallo segnalato.

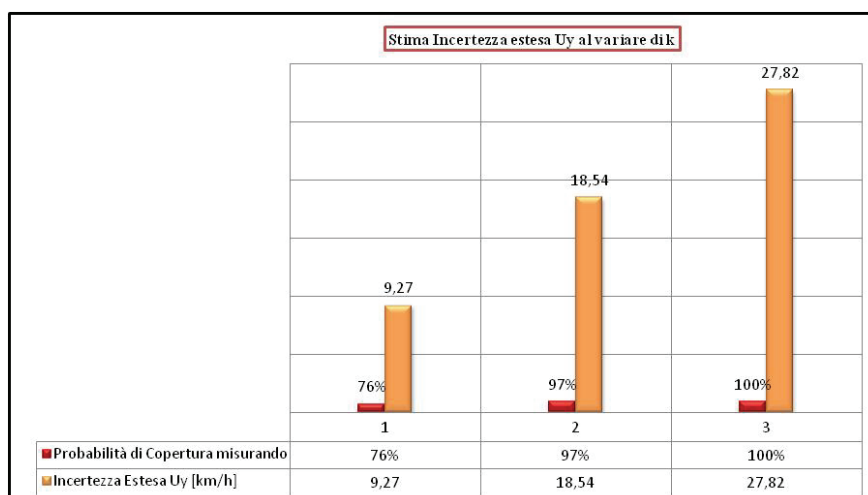


Figura 43_ Legame tra $U(y)$ e k per Modello di previsione V_{85} su rettifili con $L < 500$ m

5.4.2.2 Incertezza estesa dei Modelli di previsione della V_{85} in curva

L'elaborazione numerica dell'incertezza estesa $U(y)$, associata al valore medio restituito dai modelli di previsione della V_{85} in curva, è riportata integralmente in Appendice B.

La Figura 44 mostra il legame, per il modello di previsione della V_{85} su elementi curvilinei circolari con $CCR_m > 240$ gon/km, tra il fattore k ed il livello di confidenza associato all'intervallo $[V_{85m} - k \cdot u_c(y); V_{85m} + k \cdot u_c(y)]$.

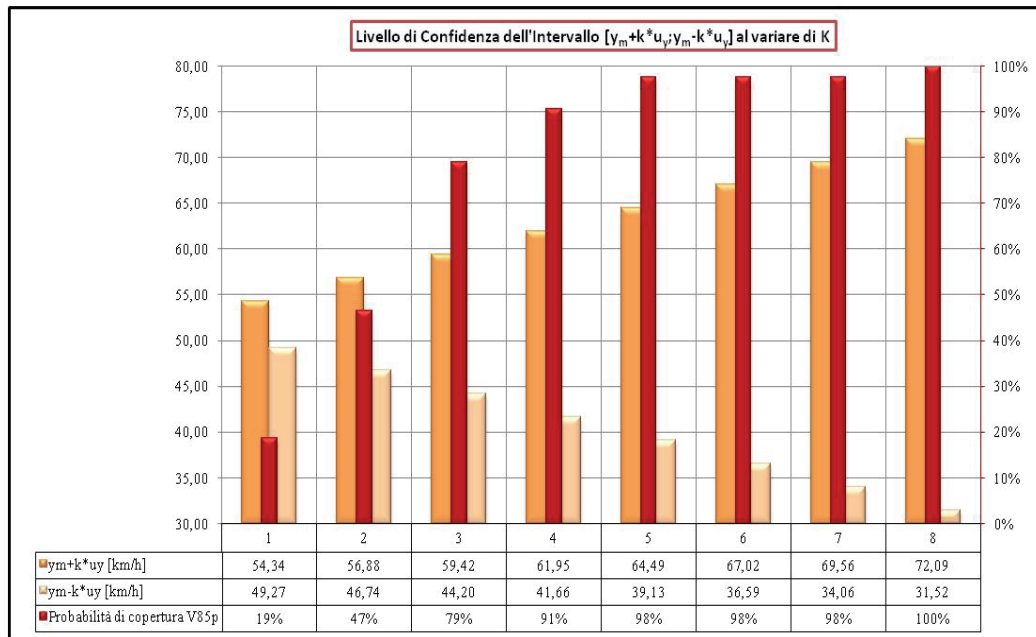


Figura 44_Legame tra livello di confidenza e k (Modello V_{85} su curve con $CCR_m > 240$ gon/km)

Il diagramma in Figura 44 mostra che per un fattore di copertura $k = 3$ il livello di confidenza dell'intervallo è pari a 0,79; l'intervallo $[V_{85m} - 3 \cdot u_c(y); V_{85m} + 3 \cdot u_c(y)] = [44,20 \text{ km/h}; 59,42 \text{ km/h}]$ comprende più della metà dei possibili valori di velocità operativa, attribuibili al misurando, pari al 79% dell'intera distribuzione.

Nel caso di $k = 4$ il livello di confidenza dell'intervallo è pari a 0,91; l'intervallo $[V_{85m} - 4 \cdot u_c(y); V_{85m} + 4 \cdot u_c(y)] = [41,66 \text{ km/h}; 61,95 \text{ km/h}]$ comprende un numero di valori di velocità operativa, attribuibili al misurando, superiore rispetto al caso precedente, raggiungendo il 91% dell'intera distribuzione delle misure predette.

In corrispondenza, invece, del fattore di copertura $k = 5$ il livello di confidenza dell'intervallo è pari a 0,98; l'intervallo $[V_{85m} - 5 \cdot u_c(y); V_{85m} + 5 \cdot u_c(y)] = [39,13 \text{ km/h}; 64,49 \text{ km/h}]$ raccoglie un campione di V_{85} predette di dimensioni maggiori rispetto al caso precedente e pari al 98% dell'intera distribuzione.

In Figura 45 è, invece, presentato, per il medesimo modello, il legame tra l'intervallo di confidenza $[V_{85m} - k u_c(y); V_{85m} + k u_c(y)]$ e l'incertezza estesa $U(y)$, al variare del fattore di copertura k .

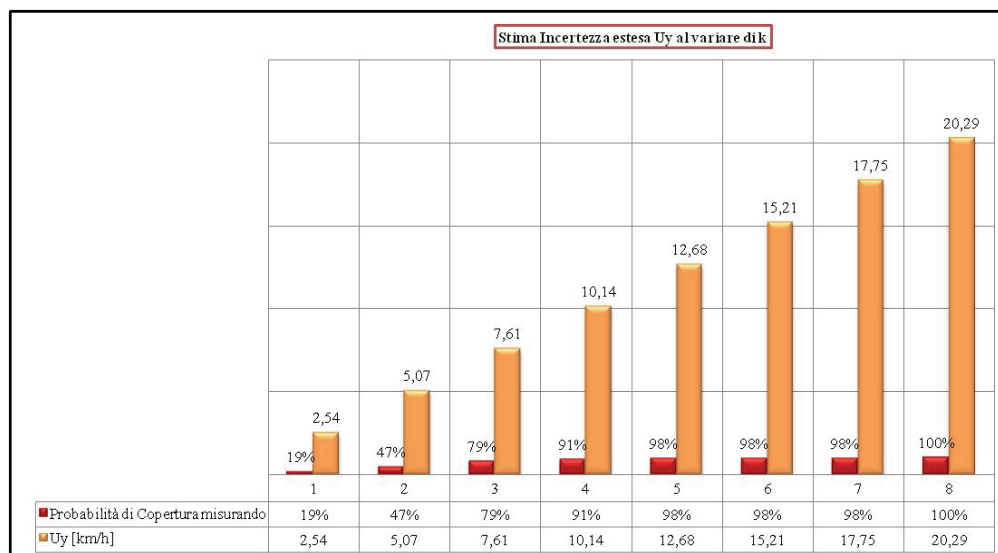


Figura 45_ Legame tra $U(y)$ e k per Modello di previsione V_{85} su curve con $CCR_m > 240$ gon/km

Il diagramma in Figura 45 evidenzia che per un fattore di copertura $k = 3$ l'incertezza estesa, abbinata al valore medio restituito dal modello, è di 7,61 km/h, con una copertura del 79% dell'intera distribuzione dei valori. L'incertezza estesa è da ritenersi più che accettabile.

Quando il fattore k raggiunge un valore pari a 4, l'incertezza estesa diventa di 10,14 km/h, con una copertura del 91% dell'intera distribuzione dei valori; anche in questa circostanza, come la precedente, la stima dell'errore è ammissibile, presentandosi più della metà del campione compreso nell'intervallo.

In corrispondenza, invece, del fattore di copertura $k = 5$ l'incertezza estesa è pari a 12,68 km/h, con una copertura del 98% dell'intera distribuzione dei valori.

L'incertezza estesa per $k = 5$ assume un valore leggermente superiore rispetto ai casi precedenti ma il numero di punti appartenenti all'intervallo definito è maggiore.

La Figura 46 mostra il legame, per il modello di previsione della V_{85} su elementi curvilinei circolari con $CCR_m < 240$ gon/km, tra il fattore k ed il livello di confidenza associato all'intervallo $[V_{85m} - k u_c(y); V_{85m} + k u_c(y)]$.

Il diagramma in Figura 46 mostra che per un fattore di copertura $k = 3$ il livello di confidenza dell'intervallo è pari a 0,67, in quanto l'intervallo $[V_{85m} - 3 \cdot u_c(y); V_{85m} + 3 \cdot u_c(y)] = [49,31 \text{ km/h}; 73,28 \text{ km/h}]$ comprende più della metà dei possibili valori di velocità operativa, attribuibili al misurando, per il 67% dell'intera distribuzione.

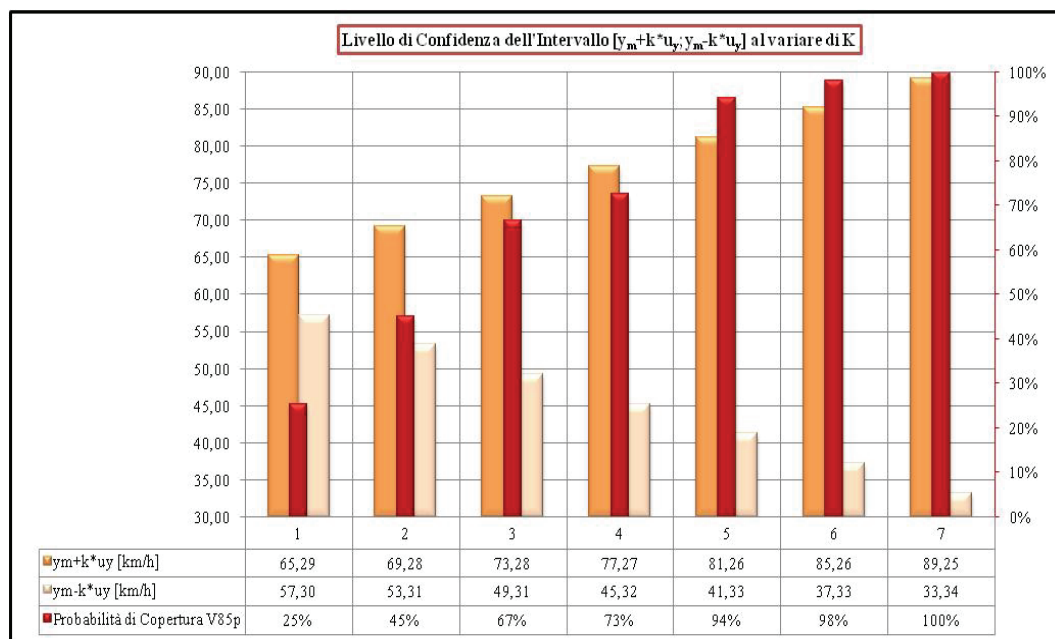


Figura 46_ Legame tra livello di confidenza e k (Modello V_{85} su curve con $CCR_m < 240$ gon/km)

In Figura 47 è presentato, per il medesimo modello, il legame tra l'intervallo di confidenza $[V_{85m} - k u_c(y); V_{85m} + k u_c(y)]$ e l'incertezza estesa $U(y)$, al variare del fattore di copertura k .

Il diagramma mostra che per un fattore di copertura $k = 3$ l'incertezza estesa, abbinata al valore medio restituito dal modello, è di 11,98 km/h, con una copertura del 67% dell'intera distribuzione dei valori. L'incertezza estesa è accettabile essendo più della metà del campione compreso nell'intervallo indicato.

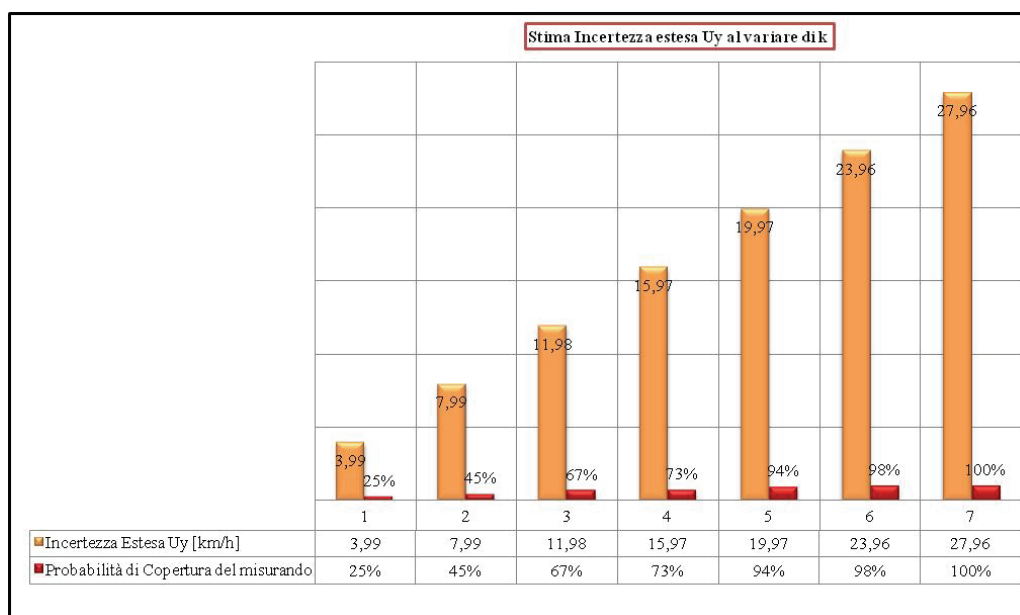


Figura 47_ Legame tra $U(y)$ e k per Modello di previsione V_{85} su rettili con $CCR_m < 240$ gon/km

In conclusione i modelli di previsione della V_{85} su rettifili e curve circolari interpretano correttamente il fenomeno reale essendo abbinati ad un grado di incertezza composta ed estesa sul valore medio relativamente limitato.

5.5 Validazione modelli di Previsione della V_{85} in rettilo e curva

I modelli predittivi della velocità operativa su rettilo e curva circolare, presentati nel corso dei paragrafi 5.2 e 5.3, sono stati convenientemente validati.

Una buona tecnica di regressione deve limitare al minimo gli errori di previsione, ossia le differenze tra i valori che sono stati effettivamente osservati e quelli previsti.

La valutazione dell'accuratezza dei modelli è stata condotta attraverso la stima di tre indicatori statistici sintetici:

- MAD (*Mean Absolute Deviation*) = Rapporto tra il valore assoluto della somma degli scarti D_i e il numero n dei siti osservati sul tracciato stradale

$$MAD = \sum_{i=1}^n |D_i| / n \quad (56)$$

- MSE (*Mean Squared Error*) = Rapporto tra la somma degli scarti D_i al quadrato e il numero n dei siti osservati

$$MSE = \sum_{i=1}^n D_i^2 / n \quad (57)$$

- I = Rapporto tra lo scarto quadratico medio degli errori e la media dei valori predetti delle velocità operative

$$I = \sqrt{MSE} / \left(\sum_{i=1}^n V_{(operating \ speed \ model)} / n \right) \quad (58)$$

La procedura di validazione ha coinvolto le strade extraurbane ad unica carreggiata S.P.135 e S.S.103, non appartenenti al campione di calibrazione dei modelli.

Si tratta di infrastrutture assimilabili a quelle impiegate nella prima fase, localizzate nella Rete ordinaria delle viabilità della Provincia di Salerno.

Le misure di velocità sono state collezionate con un Lidar gun in condizioni di flusso libero, strada asciutta e luce diurna, rispettando le prescrizioni generali di sezionamento e rilievo illustrate in dettaglio nel Capitolo 3.

Le Tabelle 44 e 45 illustrano le statistiche descrittive delle principali caratteristiche geometriche e cinematiche dei rettifili e delle curve circolari, rispettivamente, appartenenti al campione delle due strade sulle quali si validano i risultati.

Tabella 44 Statistica delle caratteristiche dei rettifili sulla S.P. 135 ed S.S. 103

	CCR _m [gon/km]	Larghezza carreggiata [m]	Raggio della curva precedente [m]	Sviluppo elemento [m]	Distanza dalla curva precedente [m]	Densità di accessi per km	V ₈₅ rilevata [km/h]	V ₈₅ della curva precedente [km/h]
Valore Medio	80,66	8,25	330,00	774,27	616,38	5,40	85,81	70,64
Valore Massimo	131,27	10,70	500,00	1092,00	1342,00	13,00	101,35	84,00
Valore Minimo	30,05	5,44	150,00	89,00	224,00	1,00	59,80	54,00
Std. Dev.	0,00	0,17	64,89	132,42	261,27	0,93	5,48	11,19

Tabella 45 Statistica delle caratteristiche delle curve circolari sulla S.P. 135 ed S.S. 103

	CCR _m [gon/km]	Larghezza carreggiata [m]	Sviluppo del rettifilo precedente [m]	Sviluppo elemento [m]	CCR _s [gon/km]	Densità di accessi per km	V ₈₅ rilevata [km/h]
Valore Medio	179,89	6,88	525,99	74,52	426,55	6,73	69,34
Valore Massimo	503,17	10,80	1699,00	267,67	1411,06	13,00	95,00
Valore Minimo	58,83	1,13	337,87	39,90	202,10	2,61	8,43
Std. Dev.	30,05	5,87	0,00	10,27	90,05	1,00	48,00

La validazione del modello di previsione delle velocità operative sui rettifili con lunghezza maggiore di 500 m ha coinvolto 12 siti, di cui 8 appartenenti alla S.P.135 e 4 alla S.S.103.

In Tabella 46 è illustrato, per ciascun sito monitorato, la misura del residuo, valutato come differenza tra velocità operativa predetta ed osservata, in km/h, per il modello (37).

La Carta di Controllo statistico dei residui è mostrata in Figura 48, ed evidenzia che la totalità degli scarti ricade nella fascia $[\mu - 2\sigma ; \mu + 2\sigma] = [-29,29 \text{ km/h} ;$

22,30 km/h]. In particolare, è possibile notare che il 67% dei residui ricade nel range $\mu \pm \sigma = -16,39 \text{ km/h} \div 9,40 \text{ km/h}$, dove il massimo scarto è risultato di -14,54 km/h.

Si rileva che più del 50% delle sezioni osservate registra un errore inferiore a 15 km/h. Tale misura è da ritenersi senza dubbio accettabile per strade in condizioni di flusso libero.

Tabella 46_ Residui Modello di previsione V_{85} su rettifili con $L > 500 \text{ m}$

Strada	N°sez.	N°sito	V_{85} osservata [km/h]	V_{85} da modello [km/h]	Errore [km/h]
			Y_i	\hat{Y}_i	$\hat{Y}_i - Y_i = D_i$
SS135	25	1	77,00	78,03	1,03
SS135	37	2	78,35	68,46	-9,89
SS135	38	3	73,00	68,46	-4,54
SS135	39	4	83,00	68,46	-14,54
SS135	25	5	74,00	75,43	1,43
SS135	37	6	78,00	95,72	17,72
SS135	38	7	90,00	95,72	5,72
SS135	39	8	71,00	90,09	19,09
SP103	59	9	93,00	87,10	-5,90
SP103	60	10	101,35	87,10	-14,25
SP103	59	11	95,90	77,53	-18,37
SP103	60	12	96,95	77,53	-19,42

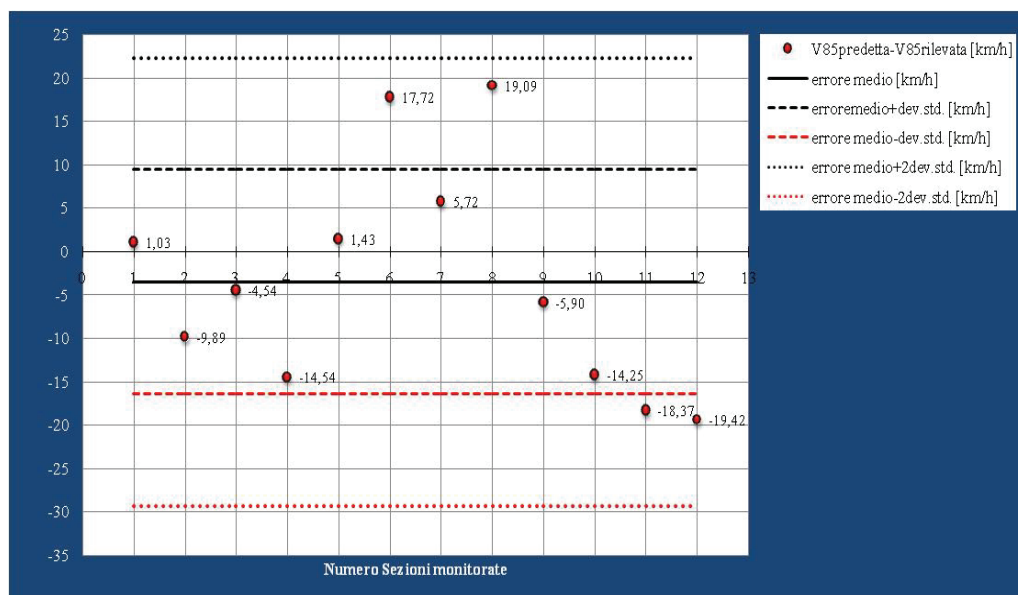


Figura 48_ Carta di Controllo Statistico degli errori per Modello su rettifili con $L > 500 \text{ m}$

Il diagramma di Performance del modello (37) applicato ai siti indicati in Tabella 46, è presentato in Figura 49.

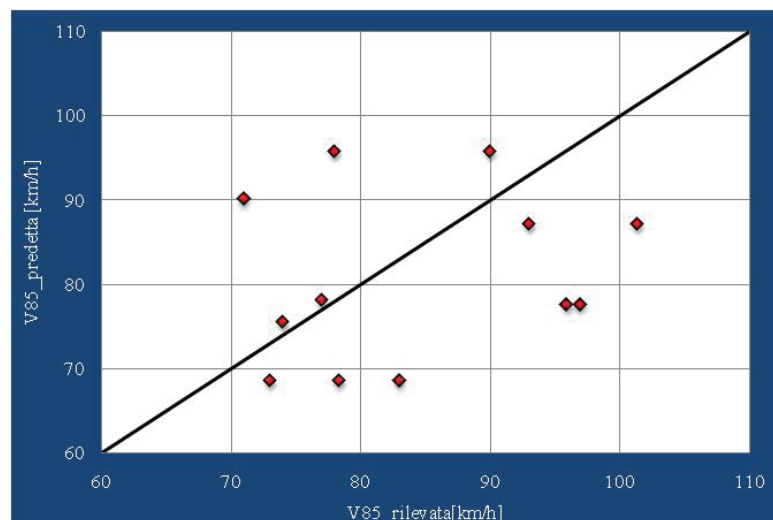


Figura 49_ Diagramma di Performance del Modello predittivo su rettili con L > 500 m

Il grafico mostra una distribuzione quasi omogenea delle misure.

La validazione del modello di previsione delle velocità operative sui rettili con lunghezza minore di 500 m ha coinvolto, invece, 7 siti, tutti appartenenti alla S.P.135. Si ricorda che per ciascun sito si è raggiunto un numero minimo di osservazioni di velocità per veicolo isolato pari a 100. In Tabella 47 è illustrato, per ciascun sito, il rispettivo residuo, stimato come differenza tra velocità operativa predetta ed osservata, in km/h.

Tabella 47_ Residui Modello di previsione V₈₅ su rettili con L < 500 m

			V ₈₅ osservata [km/h]	V ₈₅ da modello [km/h]	Errore [km/h]
Strada	N°sez.	N°sito	Y _i	Y _i	Y _i -Y _i =D _i
SS135	11	1	59,80	71,59	11,8
SS135	21	2	76,00	73,88	-2,1
SS135	49	3	63,00	68,39	5,4
SS135	50	4	69,00	83,93	14,9
SS135	1	5	78,05	76,74	-1,3
SS135	11	6	72,10	74,24	2,1
SS135	21	7	80,00	100,86	20,9

La Carta di Controllo statistico dei residui, presentata in Figura 50, mostra come tutti gli scarti del modello (38) rientrano nella fascia $[\mu - 2\sigma ; \mu + 2\sigma] = [-14,48$

km/h ; 29,25 km/h]. In particolare, è possibile notare che l'86% dei residui ricade nel range $\mu \pm \sigma = -3,55 \text{ km/h} \div 18,31 \text{ km/h}$, dove il massimo scarto è di 14,90 km/h.

Si rileva che più del 50% delle sezioni osservate, registra un errore inferiore a 15 km/h. Tale valore è da ritenersi senza dubbio accettabile per strade in condizioni di flusso libero.

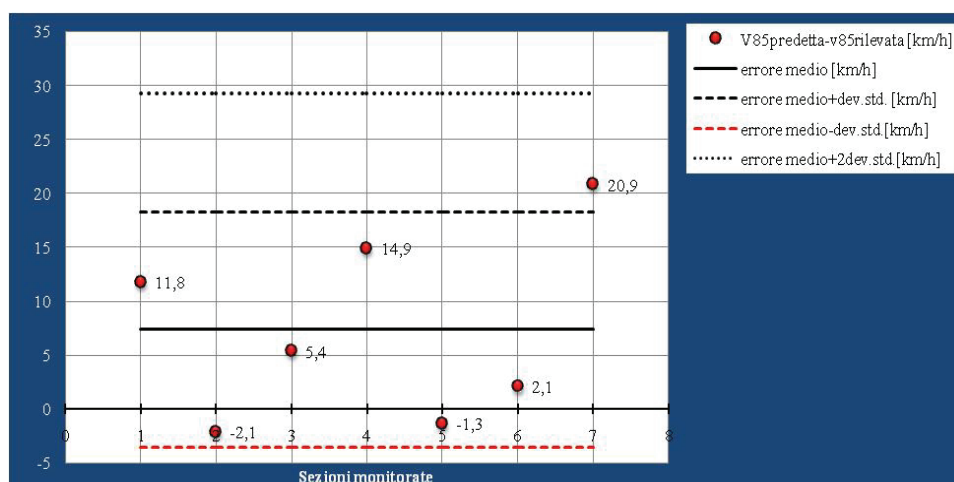


Figura 50_ Carta di Controllo Statistico degli errori per Modello su rettili con L < 500 m

Il diagramma di Performance del modello (38), applicato ai siti indicati in Tabella 47, è presentato in Figura 51.

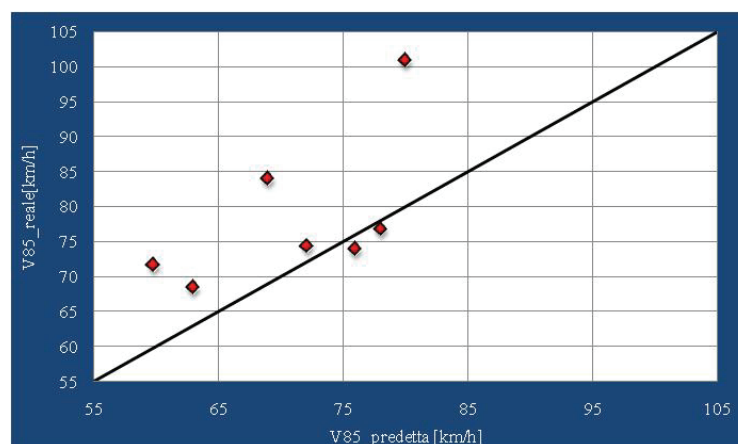


Figura 51_ Diagramma di Performance del Modello predittivo su rettili con L < 500 m

La procedura di validazione del modello di previsione delle velocità operative su curve circolari con CCR > 240 gon/km ha coinvolto 32 siti tutti appartenenti alla S.S.103. In Tabella 48 è illustrato, per ciascun sito monitorato, il rispettivo residuo, in km/h.

La Carta di Controllo statistico dei residui è presentata in Figura 52.

Tabella 48_ Residui Modello di previsione V_{85} su curve circolari con $CCR_m > 240$ gon/km

			V_{85} osservata [km/h]	V_{85} da modello [km/h]	Errore [km/h]
Strada	N°sez.	N°sito	Y_i	\hat{Y}_i	$Y_i - \hat{Y}_i = D_i$
SP103	31	1	64	62,0	-2,1
SP103	34	2	59	54,0	-5,0
SP103	36	3	53	57,0	4,0
SP103	38	4	62	63,0	1,0
SP103	41	5	55	61,0	6,5
SP103	42	6	59	60,0	0,9
SP103	44	7	66	60,0	-6,0
SP103	45	8	64	62,0	-2,0
SP103	47	9	68	63,0	-5,0
SP103	48	10	65	67,0	2,0
SP103	49	11	63	63,0	0,0
SP103	50	12	68	64,0	-3,9
SP103	55	13	59	70,0	11,0
SP103	93	14	59	53,0	-6,0
SP103	96	15	53	51,0	-2,0
SP103	99	16	62	57,0	-4,7
SP103	31	17	73	62,0	-11,0
SP103	34	18	74	59,0	-15,0
SP103	36	19	52	60,0	7,8
SP103	38	20	58	63,0	5,0
SP103	41	21	68	60,0	-7,8
SP103	42	22	57	59,0	2,3
SP103	44	23	70	60,0	-9,8
SP103	45	24	73	63,0	-9,6
SP103	47	25	76	63,0	-12,8
SP103	48	26	71	65,0	-6,0
SP103	49	27	68	63,0	-5,0
SP103	50	28	63	66,0	3,0
SP103	55	29	56	70,0	13,7
SP103	93	30	60	51,0	-9,0
SP103	96	31	53	52,0	-1,0
SP103	99	32	60	57,0	-3,4

La Carta di Controllo Statistico del modello (39) mostra come tutti i residui di velocità operativa rientrino nella fascia $[\mu - 3\sigma ; \mu + 3\sigma] = [-23,10 \text{ km/h} ; 18,70 \text{ km/h}]$.

In particolare, è possibile notare che il 69% degli errori ricade nel range $\mu \pm \sigma = -9,20 \text{ km/h} \div 4,80 \text{ km/h}$, dove il massimo scarto calcolato è di -9,90 km/h.

Si osserva, di conseguenza, che più del 50% del campione riporta un errore inferiore a 15 km/h, da ritenersi in definitiva accettabile per la tipologia di strada esaminata in condizioni di flusso libero.

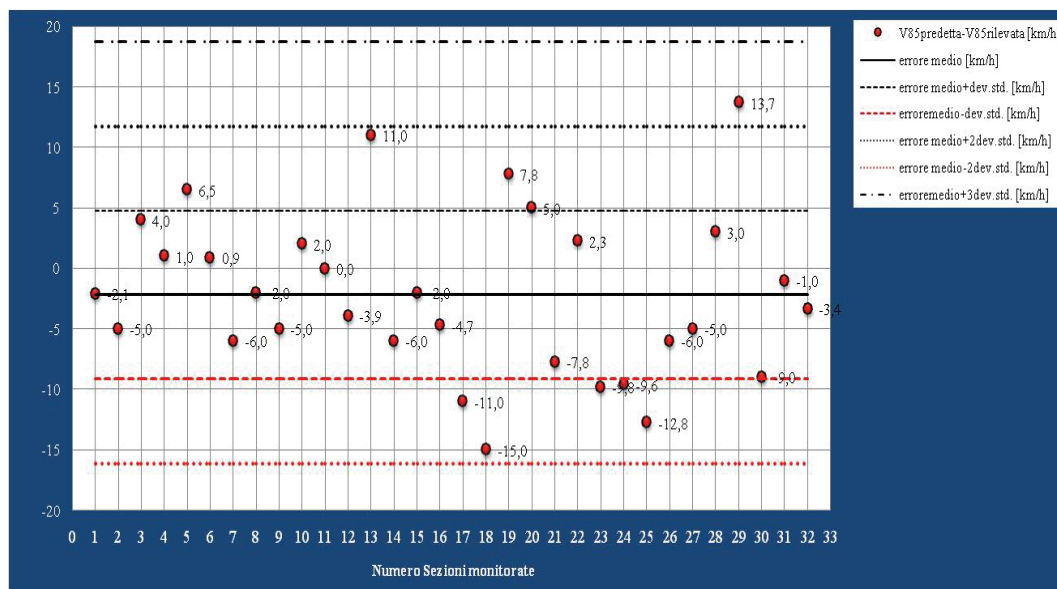


Figura 52_ Carta di Controllo Statistico errori per Modello curve con $CCR_m > 240$ gon/km

La Figura 52 rivela che il range $\mu \pm 2 \sigma = -16,10 \text{ km/h} \div 11,80 \text{ km/h}$ raccoglie il 97% della distribuzione globale degli scarti, dove il massimo valore registrato è pari a -15,00 km/h.

Il diagramma di Performance del modello (39), applicato ai siti presentati in Tabella 48, è mostrato in Figura 53

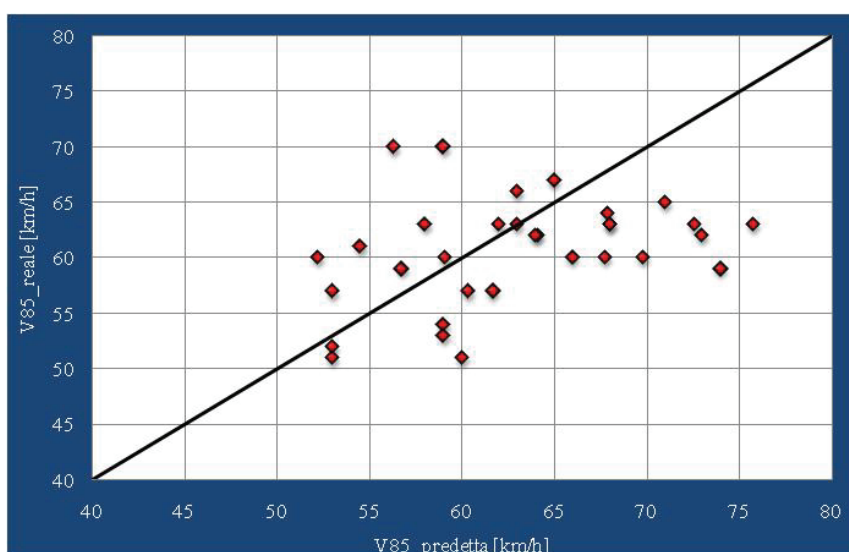


Figura 53_ Diagramma di Performance Modello predittivo curve con $CCR_m > 240$ gon/km

La Figura evidenzia un'omogenea distribuzione dei punti intorno alla bisettrice del primo quadrante, registrando un ridotto scarto.

La procedura di validazione, infine, del modello di previsione delle velocità operative su curve circolari con CCR inferiore a 240 gon/km ha coinvolto 22 siti di cui 8 appartenenti alla S.P.135 ed i restanti 14 alla S.S.103. In Tabella 49 è illustrato, per ciascun sito monitorato il rispettivo residuo, in km/h.

La Carta di Controllo statistico dei residui è mostrata in Figura 54 dove si osserva che tutti gli scarti rientrano nella fascia $[\mu - 3\sigma ; \mu + 3\sigma] = [-42,70 \text{ km/h} ; 46,50 \text{ km/h}]$. In particolare, è possibile notare che il 59% degli errori ricade nel range $\mu \pm \sigma = -12,97 \text{ km/h} \div 16,77 \text{ km/h}$, dove il massimo valore conteggiato è di 11,60 km/h. Si deduce, pertanto, che più del 50% del campione esaminato registra un errore inferiore a 15 km/h, da ritenersi in definitiva accettabile per le strade extraurbane in condizioni di flusso libero.

Tabella 49_ Residui Modello di previsione V_{85} su curve circolari con $CCR_m < 240 \text{ gon/km}$

Strada	N°sez.	N°sito	V_{85} osservata [km/h]	V_{85} da modello [km/h]	Errore [km/h]
			Y_i	\hat{Y}_i	$Y_i - \hat{Y}_i = D_i$
SS135	6	1	66,0	72,6	6,6
SS135	16	2	70,0	73,0	3,0
SS135	22	3	82,0	71,7	-10,3
SS135	43	4	69,0	76,9	7,9
SS135	6	5	76,0	72,6	-3,4
SS135	16	6	76,0	73,9	-2,1
SS135	22	7	81,0	71,3	-9,7
SS135	43	8	73,3	76,5	3,2
SS103	56	9	64	91,5	27,4
SS103	58	10	59	92,4	33,4
SS103	77	11	53	50,4	-2,6
SS103	80	12	62	60,5	-1,5
SS103	84	13	55	45,9	-8,6
SS103	86	14	59	59,5	0,4
SS103	90	15	66	49,1	-16,9
SS103	56	16	64	91,5	27,5
SS103	58	17	68	92,6	24,6
SS103	77	18	65	50,6	-14,4
SS103	80	19	63	60,7	-2,3
SS103	84	20	68	45,9	-22,0
SS103	86	21	48	59,6	11,6
SS103	90	22	59	49,1	-9,9

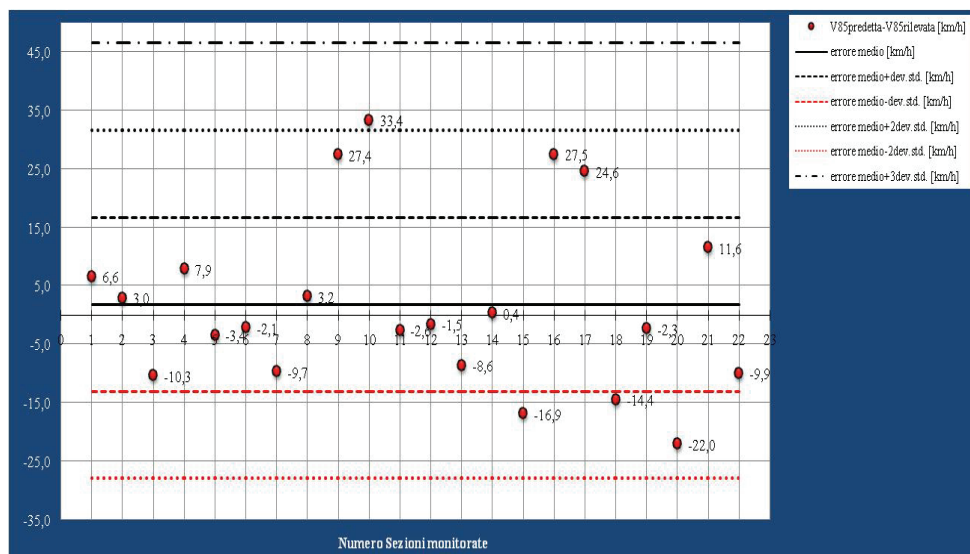


Figura 54_ Carta di Controllo Statistico errori per Modello curve con $CCR_m < 240$ gon/km

In conclusione, si può affermare che i modelli di previsione della V_{85} , proposti in questo lavoro di ricerca, si presentano statisticamente significativi ed accurati, in quanto, nella maggior parte dei casi, i residui stimati tra valore di velocità operativa predetta ed osservata rientrano in un range limitato intorno al valore medio. Ciò è confermato anche dagli indicatori statistici sintetici, riportati in Tabella 50, dove tanto più i parametri sono limitati tanto più sono indici di accuratezza ed efficacia del modello.

MAD e MSE si presentano in tutte e quattro i casi generalmente non elevati ed I sempre inferiore a 0,2.

Tabella 50 Validazione : Parametri Statistici Sintetici dei quattro modelli predittivi della V_{85}

Modello di previsione della V_{85}	Errore Medio [km/h]	MAD	MSE	I
Rettifilo con lunghezza > 500 m	-3,49	11,0	166,3	0,15
Rettifilo con lunghezza < 500 m	7,38	8,4	119,5	0,13
Curve circolari con $CCR_m > 240$ gon/km	-2,20	5,80	48,60	0,11
Curve circolari con $CCR_m < 240$ gon/km	1,90	11,30	221,0	0,183

CAPITOLO 6. ANALISI DI SENSITIVITA': CALIBRAZIONE DI UN MODELLO DI PREVISIONE DELLA CONGRUENZA DEI TRACCIATI STRADALI ESISTENTI

6.1 Introduzione

Il profilo delle velocità operative è uno strumento largamente adoperato, nel campo della progettazione geometrica e funzionale delle strade, per verificare la congruenza dei tracciati nuovi ed esistenti. Il profilo di velocità favorisce l'individuazione di condizioni anomale sullo sviluppo degli elementi geometrici componenti, causa di possibili peggioramenti delle condizioni di marcia dell'utente.

Numerosi ricercatori [49] [64] hanno dimostrato che, l'analisi della congruenza dei tracciati stradali in termini esclusivamente della differenza di velocità operativa tra successivi elementi, sottostima la reale variazione di velocità, non prefigurandosi come un indice verosimile dell'omogeneità e del grado di sicurezza di un tracciato.

Negli ultimi anni diverse metodologie alternative per l'analisi di congruenza [45] [72] sono state formulate in modo da superare, almeno in parte, alcune delle limitazioni osservate.

6.2 Metodologie presenti in Letteratura

La Congruenza dei tracciati stradali è definita in letteratura [1] come il grado di rispondenza della geometria e delle caratteristiche funzionali stradali alle attese del conducente.

Numerosi gruppi di ricerca hanno rilevato che gli utenti preferiscono, il più delle volte, sacrificare il comfort di marcia piuttosto che accettare, passivamente, il “disagio” di una velocità d'avanzamento ridotta, provocata da irregolarità nel tracciato; da qui l'importanza di progettare infrastrutture il più possibili conformi alle aspettative di sicurezza dei guidatori.

Il Decreto Ministeriale 5/11/2001 [7] definisce, per le nuove infrastrutture, un *Intervallo di Velocità di Progetto* con il quale le caratteristiche geometriche degli elementi componenti il tracciato devono determinarsi. La verifica di congruenza, richiesta da Norma, si limita alla rappresentazione del diagramma delle velocità di

progetto, per senso di marcia, e alla definizione delle differenze di velocità tra due elementi contigui del tracciato. Le disposizioni cogenti [7] richiedono che, nei tratti con limite superiore dell'intervallo di velocità di progetto maggiore di 100 km/h ed inferiore a 80 km/h, la differenza non deve superare i 10 km/h ed i 5 km/h, rispettivamente; negli altri tratti, caratterizzati da una velocità di progetto più bassa, la differenza di velocità non deve superare i 20 km/h.

Trattandosi, quindi, di una verifica globale sulle scelte puntuali dei vari elementi, nel caso tali condizioni non siano soddisfatte, anche solo in singole parti, occorrerà ridisegnare la geometria d'interi tronchi.

La procedura illustrata si prefigura faticosa da applicare alle Infrastrutture esistenti. La Normativa italiana [7], impiegando come unico parametro di controllo la sola velocità di progetto, non fornisce indicazioni specifiche sulle verifiche legate all'utilizzo della velocità operativa, demandando alla sensibilità del progettista i criteri da adottare in proposito. Tale limitazione ha determinato la non necessità ed urgenza, da parte dei progettisti, di una formulazione ufficiale della V_{85} .

Sul piano scientifico diversi studiosi italiani hanno trattato l'argomento, pervenendo a relazioni che legano la velocità operativa alle caratteristiche della strada, sulla scorta dei dati provenienti da campagne d'indagini sperimentali più o meno estese [38] [45].

I tradizionali principi della progettazione stradale, in definitiva, pur se fondati su osservazioni teoriche e analitiche di generale validità, non sono in grado di rappresentare le differenze decisionali tra i diversi utenti.

In letteratura la procedura maggiormente adoperata, per la verifica dell'omogeneità di un tracciato stradale, è raffigurata dai tre criteri di Lamm [31].

Il primo criterio, riassunto in Tabella 51, suggerisce di stimare, per ciascun elemento geometrico, la differenza tra velocità operativa, rilevata o predetta, e velocità di progetto, attribuendo alla misura un giudizio qualitativo indice del grado di sicurezza e, quindi, di omogeneità percepito dall'utente in transito.

Tabella 51 Primo criterio di Lamm, tratto da [71]

I Criterio di Lamm	
Livello di progettazione	Intervallo raccomandato
Buono	$ V_{85} - V_p \leq 10 \text{ km/h}$
Tollerabile	$10 \text{ km/h} < V_{85} - V_p \leq 20 \text{ km/h}$
Non adeguato	$ V_{85} - V_p > 20 \text{ km/h}$

Il secondo criterio, presentato in Tabella 52, riguarda la differenza di velocità operativa tra successivi elementi geometrici del tracciato, attribuendo alla misura un giudizio qualitativo sul grado di omogeneità percepito dall'utente.

Tabella 52 Secondo criterio di Lamm, tratto da [71]

II Criterio di Lamm	
Livello di progettazione	Intervallo raccomandato
Buono	$ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 10 \text{ km / h}$
Tollerabile	$10 \text{ km / h} < V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20 \text{ km / h}$
Non adeguato	$ V_{85i} - V_{85i+1} > 20 \text{ km / h}$

Il terzo criterio è mostrato in Tabella 53 dove si richiede di stimare per singolo elemento geometrico la differenza tra l'aderenza trasversale disponibile f_{td} , pari a quella di progetto [7], e richiesta f_{tr} , in genere maggiore della prima perché funzione della velocità operativa abitualmente superiore a quella di progetto.

Tabella 53 Terzo criterio di Lamm, tratto da [71]

III Criterio di Lamm	
Livello di progettazione	Intervallo raccomandato
Buono	$f_{td} - f_{tr} \geq 0,01$
Tollerabile	$-0,04 \leq f_{td} - f_{tr} < 0,01$
Non adeguato	$f_{td} - f_{tr} < -0,04$

Non tutti i criteri di Lamm possono applicarsi con facilità ad un tracciato stradale esistente; difatti, mentre per il secondo, a meno di rilievi, si prefigura fattibile la determinazione dell'85° percentile della distribuzione delle velocità per un tronco geometrico, per il primo si riscontrano le medesime difficoltà citate per il D.M. 5/11/2001 nella definizione della velocità di progetto, così come per il terzo dove campagne sperimentali permetterebbero di risalire all'aderenza trasversale disponibile ma non alla conoscenza di quella di progetto, quasi sempre ignota.

Le ipotesi di Hirsh [49], fondate sul presupposto che la valutazione della congruenza di un tracciato stradale non possa scaturire dalla semplice differenza di velocità operativa tra elementi contigui, rafforzano i risultati di molti ricercatori.

Sono stati esaminati da numerosi studiosi i differenti profili di velocità su elementi successivi di un tracciato geometrico stradale.

È stato osservato che, le diverse distribuzioni di velocità rilevate in differenti siti su rettilineo e curva circolare, non convalidano la tesi di una stima dell'omogeneità attraverso le sole differenze di velocità tra i diversi elementi geometrici, essendo le distribuzioni completamente differenti da punto a punto.

A titolo di esempio si riportano in Figura 55 tipiche distribuzioni di velocità media per alcune sezioni rilevate su parte delle infrastrutture monitorate. E' stata messa in luce la forte diversità nella forma delle distribuzioni di velocità tra contigui elementi geometrici tra cui le transizioni rettilineo – curva – rettilineo.

La diversità di comportamento dell'utente tra consecutivi elementi di un tracciato stradale conferma le ipotesi di Hirsh.

Il diagramma propone un grafico 3D dove si riportano sull'asse y la distanza, in chilometri, della sezione monitorata dalla sezione MC di centro – curva (le distanze sono positive nella fase di ingresso – curva, negative nella fase di allontanamento), sull'asse x il valore della velocità media rilevata (V_m), in km/h, e sull'asse z la Deviazione Standard della distribuzione delle velocità per ciascuna sezione, in km/h [64]

Tutti i diagrammi illustrano che al ridursi della distanza della sezione esaminata dal centro - curva MC, le misure V_m e Dev. Std. diminuiscono, mentre all'aumentare di tale distanza i valori V_m e Dev. Std. s'incrementano; ciò deriva, in maggior misura, dalle condizioni di marcia registrate sulle curve circolari.

Le velocità sugli elementi a curvatura costante assumono, di solito, una variabilità più bassa (Dev. Std. della distribuzione per sito più bassa) rispetto a quella dei rettilinei limitrofi; la scelta delle velocità da parte degli utenti sono, difatti, più restrittive e maggiormente vincolate alle caratteristiche geometriche degli stessi.

Sui rettilinei, al contrario, la dispersione delle velocità medie per sito è più alta (Dev. Std. della distribuzione delle velocità per sito più alta) di quella riscontrata in curva, dal momento che l'utente è più libero di prediligere la condotta di marcia desiderata, presentandosi lungo lo sviluppo dell'elemento meno limitazioni e restrizioni geometriche.

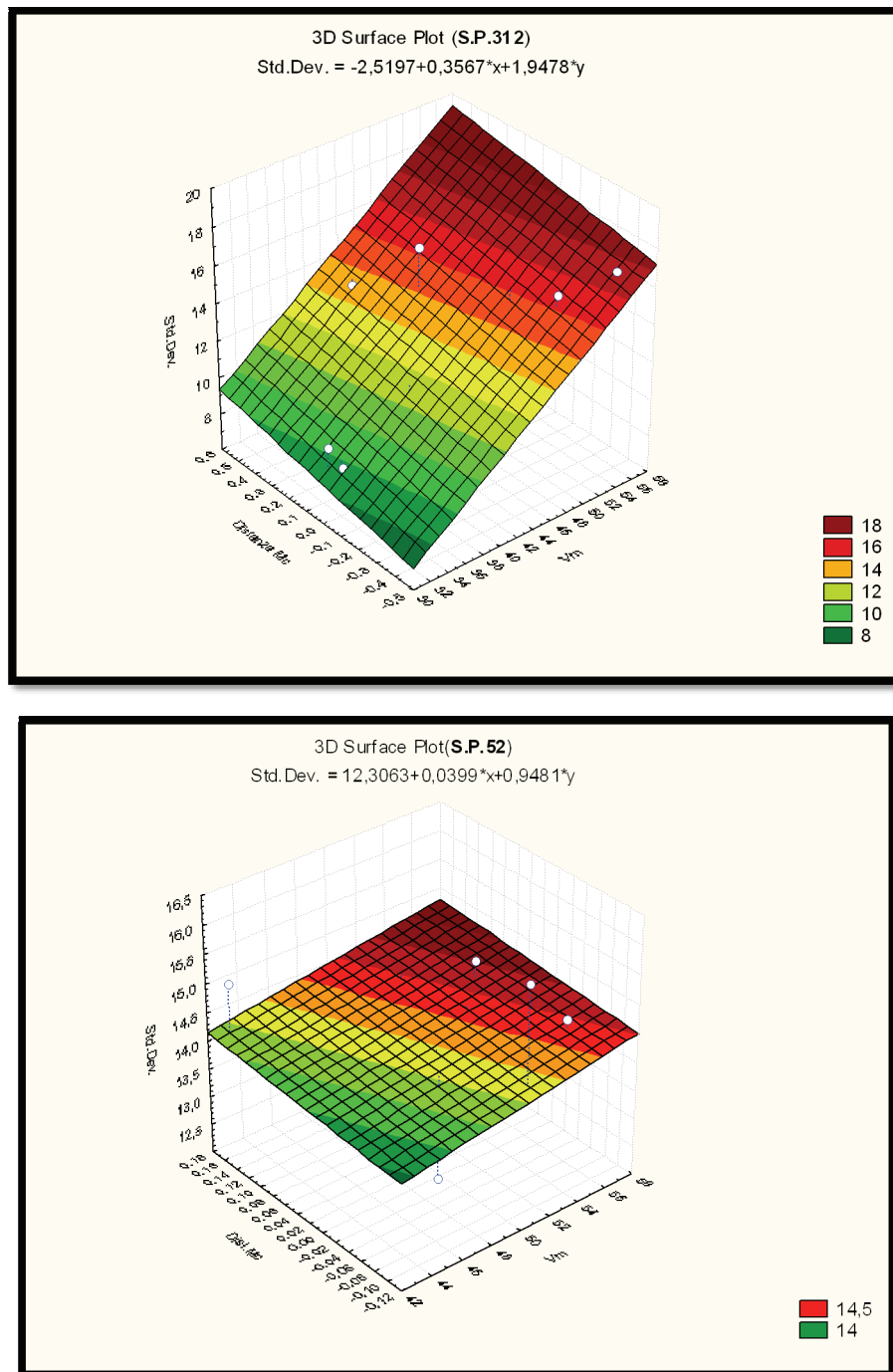


Figura 55_Esempio Distribuzione Velocità per differenti postazioni sul tronco di Transizione

6.3 Modello di previsione della congruenza dei tracciati stradali esistenti

Due parametri per la valutazione della congruenza dei tracciati stradali esaminati, relativi alle otto strade extraurbane monitorate (sei appartenenti al campione di calibrazione dei modelli ed analisi delle transizioni, mentre due appartenenti al

campione di validazione dei risultati ottenuti) sono stati ricavati nel corso del presente lavoro di ricerca; entrambi sono finalizzati alla definizione di una procedura per la calibrazione e taratura di un modello di previsione dell'Omogeneità.

L'obiettivo è la formulazione di un parametro che illustri il grado di Congruenza dell'intero sviluppo del tracciato, non limitandosi all'analisi di elementi geometrici contigui, ma rispecchiando l'intero profilo delle velocità operative, predette o rilevate.

La prima fase della procedura consiste nella costruzione del profilo delle velocità operative lungo il tracciato analizzato, applicando i risultati dell'analisi del moto lungo le transizioni (Capitolo 4) ed i quattro modelli di previsione della V_{85} su rettilineo e curva circolare (Capitolo 5). La tipicità dei modelli, calibrati e validati, è insita nel definire un valore di V_{85} per ogni generica posizione sul tronco stradale. Il diagramma finale delle velocità operative non presenta, quindi, tratti costanti al variare della curvatura geometrica, ma spezzate.

Per semplificare la procedura ed ottenere, mediante un'analisi di sensitività, un modello semplice ed efficace di previsione della congruenza [72], è stato stimato per ciascun tronco geometrico (rettilineo e curva circolare) la media delle velocità operative predette.

Il primo parametro definito come misura di congruenza è indicato, simbolicamente, con R_a [72]; esso rappresenta l'area relativa normalizzata (per unità di lunghezza) tra il profilo delle velocità operative e la velocità operativa media ponderale (\bar{V}_{85_p}) sull'intero sviluppo geometrico del tracciato, dove il peso è raffigurato dallo sviluppo di ciascun elemento.

Indicando con a_i , l'area compresa tra il profilo delle velocità operative e la misura di \bar{V}_{85_p} , intesa positiva o negativa a seconda se posta al di sopra o al di sotto della velocità media ponderale del tracciato, come in Figura 56, la prima misura di congruenza è data dalla seguente espressione (59):

$$R_a = \sum |a_i| / L \quad (59)$$

dove

R_a = Area relativa normalizzata, in m/s

$\sum |a_i|$ = Somma del valore assoluto delle aree comprese tra il profilo delle velocità operative e la misura \bar{V}_{85_p} , in metri

$L = \text{Sviluppo totale del tracciato, in metri}$

Ovviamente nel caso in esame si perviene per ciascuna infrastruttura analizzata a due differenti valori di R_a , essendo i tassi di decelerazione ed accelerazione differenti, ed i modelli calibrati, predittivi della V_{85} , funzione della posizione del generico sito sul tronco geometrico stradale.



Figura 56_ Profilo di Velocità operativa su S.S.103 e misure di congruenza

La seconda misura di congruenza è la Deviazione Standard della distribuzione delle velocità operative sull'intero sviluppo del tracciato stradale, valutata con la (60):

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{V}_{85i} - \bar{V}_{85-P})^2 / n} \quad (60)$$

dove

$\sigma = \text{Deviazione Standard della distribuzione delle velocità operative predette lungo il tracciato, in km/h}$

$\bar{V}_{85i} = \text{Velocità operativa media predetta sull'i-esimo tronco stradale (rettifilo o curva) con l'ausilio dei quattro modelli calibrati, in km/h}$

$n = \text{numero di elementi geometrici lungo il tracciato stradale}$

La peculiarità delle due grandezze, stimate secondo la (59) e la (60), consiste nell'apprezzare, indipendentemente, una qualità della congruenza orizzontale del tracciato, senza arrestarsi a specifiche differenze di velocità tra successivi elementi.

I parametri R_a e σ sono stati determinati per senso di marcia (*dir 0* concorde alle chilometriche crescenti e *dir 1* a quelle decrescenti) su cinque infrastrutture appartenenti al campione di calibrazione dei modelli ed analisi delle transizioni (S.P. 30b, S.P. 52, S.P. 262, S.P. 312 e S.S. 426) e sul campione di validazione dei risultati (S.P. 135 e S.S. 103), come mostrato in Tabella 54.

Tabella 54_Caratteristiche di Congruenza degli otto tracciati stradali analizzati

	σ [km/h]	R_a [m/s]	II Criterio di Lamm
DIR 0 _S.P. 135	5,581	1,073	Tollerabile = $ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20$ km/h
DIR 1 _S.P. 135	7,910	1,979	Tollerabile = $ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20$ km/h
DIR 0 _S.S. 103	11,226	2,880	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h
DIR 1 _S.S. 103	11,072	3,004	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h
DIR 0 _S.P. 30b	9,970	0,334	Tollerabile = $ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20$ km/h
DIR 1 _S.P. 30b	4,481	0,163	Buono = $ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 10$ km/h
DIR 0 _S.P. 52	9,900	1,337	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h
DIR 1 _S.P. 52	11,108	2,016	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h
DIR0 _S.P. 262	9,568	0,432	Tollerabile = $ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20$ km/h
DIR1 _S.P. 262	14,195	1,339	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h
DIR0 _S.P. 312	15,953	2,012	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h
DIR1 _S.P. 312	17,075	2,449	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h
DIR0 _S.S. 426	11,151	2,289	Tollerabile = $ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20$ km/h
DIR1 _S.S. 426	12,293	2,172	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h

A ciascun tracciato, come mostrato in Tabella 54, è stato assegnato per senso di marcia una valutazione della congruenza globale, in base alla massima differenza di velocità predetta riscontrata tra due successivi elementi con l'ausilio del *II Criterio di Lamm* [72].

La Tabella 55 mostra a titolo di esempio i risultati del secondo criterio di Lamm applicato alla S.S. 103 in *dir 1*, dove la massima differenza di velocità operativa riscontrata è risultata di 41,46 km/h, ritenuta non adeguata per una buona omogeneità del tracciato.

Tabella 55_ Secondo Criterio di Lamm applicato alla S.S. 103 in direzione delle chilometriche decrescenti

Elemento	Progr. [km]	V ₈₅ predetta [km/h]	n. Elem.	V ₈₅ medio [km/h]	ΔV ₈₅ medio [km/h]	II CRITERIO DI CONGRUENZA DI LAMM		
Inizio curva	0,020	61,76	1	61,76		Ottimo V _{85i} -V _{85i+1} ≤10 km/h	Medio V _{85i} -V _{85i+1} ≤20km/h	Scadente V _{85i} -V _{85i+1} >20km/h
Centro Curva	0,075	61,76						
Fine Curva	0,129	61,76						
Inizio curva	0,202	58,51	2	58,51	3,25	BUONO		
Centro Curva	0,220	58,51						
Fine Curva	0,238	58,51						
Inizio curva	0,250	59,29	3	59,29	0,78	BUONO		
Centro Curva	0,280	59,29						
Fine Curva	0,330	59,29						
Inizio curva	0,336	62,46	4	62,46	3,17	BUONO		
Centro Curva	0,365	62,46						
Fine Curva	0,403	62,46						
Inizio Rett.	0,450	67,81	5	67,81	5,35	BUONO		
Centro Rett.	0,495	67,81						
Fine Rett.	0,540	67,81						
Inizio curva	0,541	59,43	6	59,43	8,38	BUONO		
Centro Curva	0,545	59,43						
Fine Curva	0,558	59,43						
Inizio curva	0,577	58,58	7	58,58	0,85	BUONO		
Centro Curva	0,597	58,58						
Fine Curva	0,617	58,58						
Inizio Rett.	0,619	73,86	8	73,86	15,28	NO	TOLLERABILE	
Centro Rett.	0,643	73,86						
Fine Rett.	0,667	73,86						
Inizio curva	0,674	59,13	9	59,13	14,72	NO	TOLLERABILE	
Centro Curva	0,680	59,13						
Fine Curva	0,695	59,13						
Inizio curva	0,697	62,21	10	62,21	3,08	BUONO		
Centro Curva	0,744	62,21						
Fine Curva	0,795	62,21						
					0,69	BUONO		

Inizio curva	0,838	62,90	11	62,90				
Centro Curva	0,843	62,90						
Fine Curva	0,848	62,90						
Inizio curva	0,881	64,37	12	64,37	1,46	BUONO		
Centro Curva	0,897	64,37						
Fine Curva	0,913	64,37						
Inizio curva	0,917	62,84	13	62,84	1,52	BUONO		
Centro Curva	0,931	62,84						
Fine Curva	0,955	62,84						
Inizio curva	0,958	65,33	14	65,33	2,49	BUONO		
Centro Curva	0,985	65,33						
Fine Curva	1,012	65,33						
Inizio Rett.	1,020	60,87	15	60,87	4,46	BUONO		
Centro Rett.	1,079	60,87						
Fine Rett.	1,151	60,87						
Inizio curva	1,168	73,58	16	73,58	12,71	NO	TOLLERABILE	
Centro Curva	1,185	73,58						
Fine Curva	1,221	73,58						
Inizio curva	1,225	69,09	17	69,09	4,49	BUONO		
Centro Curva	1,247	69,09						
Fine Curva	1,289	69,09						
Inizio curva	1,430	91,51	18	91,51	22,42	NO	NO	NON ADEGUATO
Centro Curva	1,489	91,51						
Fine Curva	1,548	91,51						
Inizio Rett.	1,717	77,40	19	77,40	14,11	NO	TOLLERABILE	
Centro Rett.	1,756	77,40						
Fine Rett.	1,795	77,40						
Inizio curva	1,839	92,59	20	92,59	15,19	NO	TOLLERABILE	
Centro Curva	1,885	92,59						
Fine Curva	1,931	92,59						
Inizio curva	3,528	51,13	21	51,13	41,46	NO	NO	NON ADEGUATO
Centro Curva	3,554	51,13						
Fine Curva	3,580	51,13						
Inizio curva	3,602	61,22	22	61,22	10,09	NO	TOLLERABILE	

Centro Curva	3,617	61,22						
Fine Curva	3,632	61,22			13,80	NO	TOLLERABILE	
Inizio Rett.	3,676	75,02						
Centro Rett.	3,789	75,02	23	75,02				
Fine Rett.	3,972	75,02	24	46,41	28,61	NO	NO	NON ADEGUATO
Inizio curva	4,525	46,41						
Centro Curva	4,573	46,41						
Fine Curva	4,621	46,41	25	60,07	13,66	NO	TOLLERABILE	
Inizio curva	4,696	60,07						
Centro Curva	4,727	60,07						
Fine Curva	4,758	60,07	26	70,11	10,05	NO	TOLLERABILE	
Inizio Rett.	4,768	70,11						
Centro Rett.	4,820	70,11						
Fine Rett.	4,912	70,11	27	50,34	19,77	NO	TOLLERABILE	
Inizio curva	4,913	50,34						
Centro Curva	4,920	50,34						
Fine Curva	4,929	50,34	28	51,41	1,07	BUONO		
Inizio curva	5,154	51,41						
Centro Curva	5,193	51,41						
Fine Curva	5,232	51,41	29	52,69	1,28	BUONO		
Inizio curva	5,290	52,69						
Centro Curva	5,318	52,69						
Fine Curva	5,346	52,69	30	55,73	3,05	BUONO		
Inizio curva	5,594	55,73						
Centro Curva	5,643	55,73						
Fine Curva	5,692	55,73						

La Tabella 54 evidenzia che in presenza di una *congruenza* definita *buona* secondo Lamm, $R_a \text{ [m/s]} < 1$ e $\sigma \text{ [km/h]} < 5 \text{ km/h}$ per la S.P.30b in direzione 1.

Desiderando, pertanto, fissare un intervallo di variazione ai limiti della coppia $(R_a ; \sigma)$, è stato definito *buono* un tracciato quando $R_a \text{ [m/s]} < 1$ e $\sigma \text{ [km/h]} < 5 \text{ km/h}$, richiamando soglie già assegnate in letteratura da altri ricercatori [72].

Quando, invece, per Lamm il tracciato è provvisto di una *congruenza tollerabile* (S.P. 135, S.P. 30b dir 0, S.P. 262 dir 0 e S.S. 426 dir 0), si è rilevato che $1 < R_a \text{ [m/s]} < 2$ e $5 < \sigma \text{ [km/h]} < 10$, ad esclusione della S.S. 426 in direzione 0 dove tali limiti sono superati. Al fine di non modificare gli estremi di variazione, appena indicati, nella coppia $(R_a ; \sigma)$, in quanto richiamati per tale tipologia di congruenza anche da altri studiosi [72], si è definito *tollerabile* un tracciato quando $1 < R_a \text{ [m/s]} < 2$ e $5 < \sigma \text{ [km/h]} < 10$. Con questo presupposto la S.S. 426 è stata inserita nel database dei tracciati a *congruenza non adeguata* secondo Lamm (S.P. 103, S.P. 52, S.P. 262 dir 1, S.P. 312 e S.S. 426 dir 1), dove $R_a \text{ [m/s]} > 2$ e $\sigma \text{ [km/h]} > 10$. In due circostanze, tuttavia, questi requisiti non sono soddisfatti: S.P. 52 dir 0, dove $1 < R_a \text{ [m/s]} < 2$ e $5 < \sigma \text{ [km/h]} < 10$, nonostante il tracciato possieda per Lamm una congruenza scadente, e S.P. 262 dir 1, dove $1 < R_a \text{ [m/s]} < 2$ e $\sigma \text{ [km/h]} > 10$.

La S.P. 52 in direzione 0 è stata inclusa, di conseguenza, nell'insieme dei tracciati a congruenza tollerabile, secondo i limiti di variazione fissati alla coppia $(R_a ; \sigma)$, mentre la S.P. 262 in direzione 1 non è stata rimossa dal database dei tracciati a congruenza scadente rispondendo il peggiore dei due parametri ai requisiti richiesti.

La Tabella 56 illustra, brevemente, le soglie di variazione della coppia $(R_a ; \sigma)$ per definire buona, tollerabile e non adeguata la congruenza geometrica di un tracciato stradale orizzontale.

Tabella 56_Valutazione della Congruenza geometrica secondo i Limiti di variazione dell'intervallo $[R_a ; \sigma]$

Misura di Congruenza adottata	CONGRUENZA DEL TRACCIATO GEOMETRICO STRADALE		
	BUONA	TOLLERABILE	NON ADEGUATA
Area relativa normalizzata (R_a)	$R_a \text{ [m/s]} < 1$	$1 < R_a \text{ [m/s]} < 2$	$R_a \text{ [m/s]} > 2$
Deviazione Standard della distribuzione delle velocità operative predette lungo il tracciato (σ)	$\sigma \text{ [km/h]} < 5$	$5 < \sigma \text{ [km/h]} < 10$	$\sigma \text{ [km/h]} > 10$

La Tabella 57 raffronta due giudizi di congruenza geometrica, riguardante ciascun tracciato analizzato per senso di marcia : il primo definito in base al II Criterio di Lamm, il secondo, invece, derivato dall'applicazione dell'innovativa procedura che, attraverso la valutazione dei parametri R_a e σ , riflette l'andamento del reale profilo delle velocità operative sull'intero sviluppo del tracciato, e ne definisce una misura dell'omogeneità secondo dei limiti prefissati di variazione alla coppia ($R_a ; \sigma$).

Tabella 57_ Congruenza dei tracciati secondo i limiti fissati all'intervallo [$R_a ; \sigma$]

	II Criterio di Lamm	Congruenza ($R_a ; \sigma$)	σ [km/h]	R_a [m/s]
DIR 0 _S.P. 135	Tollerabile = $ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20$ km/h	Tollerabile	5,581	1,073
DIR 1 _S.P. 135	Tollerabile = $ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20$ km/h	Tollerabile	7,910	1,979
DIR 0 _S.S. 103	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h	Non adeguata	11,226	2,880
DIR 1 _S.S. 103	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h	Non adeguata	11,072	3,004
DIR 0 _S.P. 30b	Tollerabile = $ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20$ km/h	Tollerabile	9,970	0,334
DIR 1 _S.P. 30b	Buono = $ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 10$ km/h	Buona	4,481	0,163
DIR 0 _S.P. 52	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h	Tollerabile	9,900	1,337
DIR 1 _S.P. 52	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h	Non adeguata	11,108	2,016
DIR0 _S.P. 262	Tollerabile = $ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20$ km/h	Tollerabile	9,568	0,432
DIR1 _S.P. 262	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h	Non adeguata	14,195	1,339
DIR0 _S.P. 312	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h	Non adeguata	15,953	2,012
DIR1 _S.P. 312	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h	Non adeguata	17,075	2,449
DIR0 _S.S. 426	Tollerabile = $ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20$ km/h	Non adeguata	11,151	2,289
DIR1 _S.S. 426	Non adeguato = $ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$ km/h	Non adeguata	12,293	2,172

Il modello predittivo della Congruenza C di un tracciato geometrico stradale assume la seguente forma funzionale (61):

$$C = A \cdot e^{-B[R_a \cdot (\sigma/3,6)]} \quad (61)$$

dove

C = Congruenza geometrica per strade extraurbane a singola carreggiata

A e B = Coefficienti muti del modello predittivo

La taratura del modello (61) può essere attuata solo a partire da valori noti di Congruenza per ciascun tracciato geometrico analizzato, in maniera tale da definire i valori di A e B attraverso un'analisi di sensitività.

In letteratura sono disponibili numerose ricerche dove specifiche soglie di variazione, assegnate alla variabile dipendente C , sono suggerite per la qualificazione dell'omogeneità di un tracciato; i limiti assegnati, nella presente ricerca, al parametro C ricalcano quelli maggiormente utilizzati da studiosi in materia [72]. In Tabella 58 si osserva che laddove C è maggiore di 2 la congruenza geometrica del tracciato orizzontale è definita buona, mentre per C minore di 1 la congruenza è non adeguata; quando, invece, il parametro C oscilla tra 1 e 2 la congruenza è ritenuta tollerabile.

Tabella 58 Congruenza geometrica secondo i Limiti di variazione della variabile C

CONGRUENZA DEL TRACCIATO GEOMETRICO STRADALE		
BUONA	TOLLERABILE	NON ADEGUATA
$C > 2$	$1 < C \leq 2$	$C \leq 1$

Assegnando, preliminarmente, ai parametri A e B valori suggeriti da letteratura [72], pari a 10 ed 1, rispettivamente, si è determinata, per ciascun tracciato geometrico riportato in Tabella 57, la rispettiva misura di congruenza con la (61).

Attraverso un processo sensitivo sono stati variati i parametri A e B , al fine di restituire un'unica soluzione alla coppia di valori che soddisfacesse, in maniera univoca, le 14 valutazioni di congruenza in Tabella 57, una per ogni tracciato, dove a mutare per ogni profilo sono solo R_a , σ e la variabile d'uscita C . Il risultato dell'analisi di sensitività è riportato in Tabella 59. La coppia definitiva (A ; B) restituisce una misura C , per ogni tracciato, che riflette la soluzione presentata dalla coppia (R_a ; σ) e nel contempo i limiti di Tabella 58.

Tabella 59_ Definizione A e B per la taratura del modello predittivo della Congruenza C

	Congruenza (R_a ; σ)	σ [km/h]	R_a [m/s]	A	B	C
DIR 0_S.P. 135	Tollerabile	5,581	1,073	2,150	0,170	1,63
DIR 1_S.P. 135	Tollerabile	7,910	1,979			1,03
DIR 0_S.S. 103	Non adeguata	11,226	2,880			0,47
DIR 1_S.S. 103	Non adeguata	11,072	3,004			0,45
DIR 0_S.P. 30b	Tollerabile	9,970	0,334			1,84
DIR 1_S.P. 30b	Buona	4,481	0,163			2,08
DIR 0_S.P. 52	Tollerabile	9,900	1,337			1,16
DIR 1_S.P. 52	Non adeguata	11,108	2,016			0,75
DIR0_S.P. 262	Tollerabile	9,568	0,432			1,77
DIR1_S.P. 262	Non adeguata	14,195	1,339			0,88
DIR0_S.P. 312	Non adeguata	15,953	2,012			0,48
DIR1_S.P. 312	Non adeguata	17,075	2,449			0,30
DIR0_S.S. 426	Non adeguata	11,151	2,289			0,65
DIR1_S.S. 426	Non adeguata	12,293	2,172			0,61

La forma definitiva del modello predittivo della congruenza C è la seguente (62):

$$C = 2,150 \cdot e^{-0,17[R_a \cdot (\sigma/3,6)]} \quad (62)$$

dove tutti i parametri sono stati precedentemente definiti.

Il diagramma in Figura 57 illustra che al crescere di R_a e σ , la congruenza si riduce. È evidente, come meglio illustrato in Figura 58, che se lo scostamento tra il profilo delle velocità operative predette e la velocità media pesata sul tracciato aumenta, i fattori R_a e σ si amplificano. Tali circostanze, rispetto a tronchi geometrici ove, invece, lo scarto si presenta ridotto, sono indice di possibili anomalie nell'omogeneità di un tracciato stradale, dove occorrerebbe indagare puntualmente.

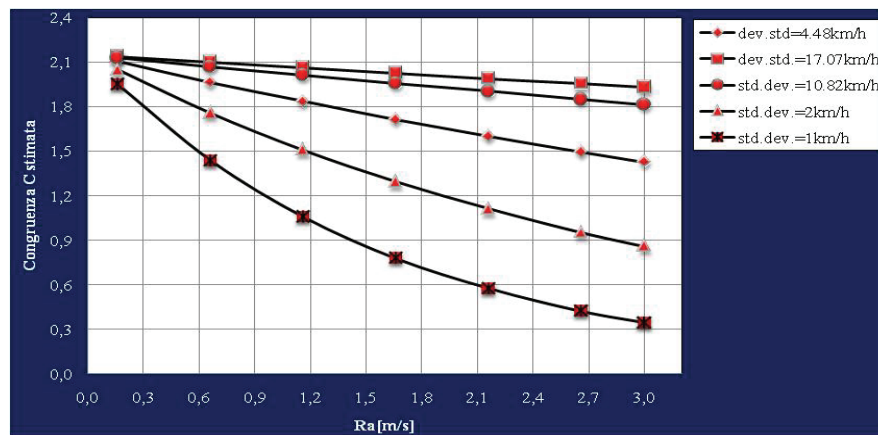


Figura 57_ Congruenza versus R_a per cinque differenti valori di σ

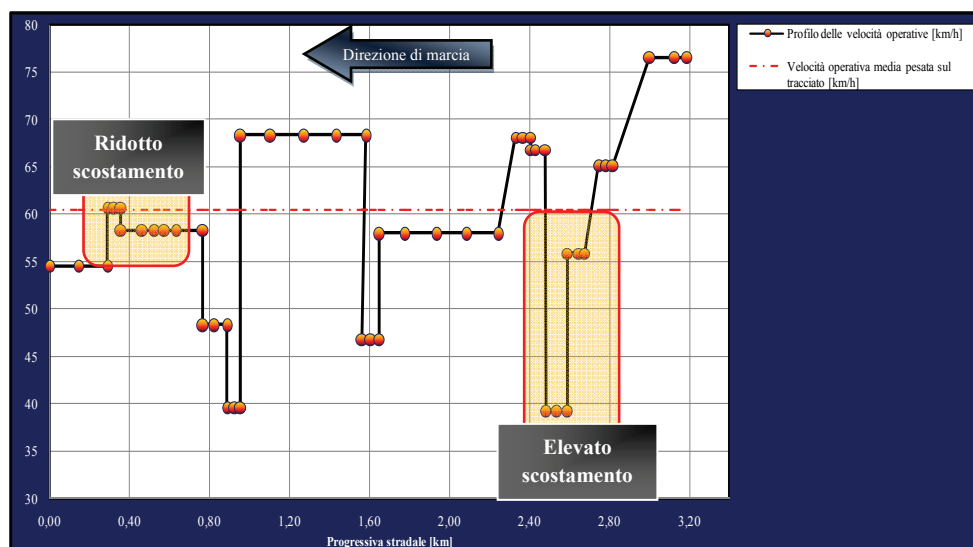


Figura 58_ Profilo di Velocità operativa su S.P.52 e misure di congruenza

CAPITOLO 7. PROCEDURA DI APPLICAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI E SVILUPPI DELLA RICERCA

Il lavoro di ricerca presentato nel corso del presente manoscritto, affrontato nel triennio del ciclo XXII di Dottorato in Ingegneria dei Sistemi Idraulici, di Trasporto e Territoriali, ha riguardato l'analisi del comportamento di guida degli utenti su strade extraurbane a singola carreggiata ricadenti nella Rete della Viabilità Ordinaria della Provincia di Salerno. I tracciati geometrici esaminati si riferiscono ad un campione di otto infrastrutture localizzate in piano, prive di raccordi clotoidici orizzontali di transizione rettilineo – curva – rettilineo, in condizioni di portata scarsa (inferiore a 400 veic/h per corsia) nelle ore di rilievo.

Obiettivo primo del presente lavoro è stato la determinazione di una procedura finita per la costruzione di un profilo continuo delle velocità operative, rivolta alla rappresentazione del reale comportamento di guida degli utenti su tronchi geometrici di strada extraurbana in rettilineo, curva circolare e transizione rettilineo – curva – rettilineo.

La ricerca è stata rivolta, finanche, alla taratura di un modello di previsione della Congruenza dei tracciati stradali per la definizione di un parametro univoco capace di interpretarne l'omogeneità globale.

L'analisi sperimentale è stata suddivisa, per gli scopi cui la ricerca s'indirizza, in due fasi: la prima è stata focalizzata sull'identificazione delle zone di transizione, impegnate dai conducenti in decelerazione nella manovra di approccio - curva e/o in accelerazione nella manovra di allontanamento, la seconda è stata, invece, orientata alla calibrazione, taratura e validazione di modelli di previsione della V_{85} , in km/h, su rettilineo e curva circolare, con conseguente analisi di sensitività dei tracciati stradali. In particolare la fase di analisi delle transizioni e sviluppo dei modelli ha previsto l'utilizzo di sei infrastrutture, mentre la fase di validazione dei risultati due infrastrutture con caratteristiche simili alle prime.

L'analisi delle transizioni è stata sviluppata adottando una metodologia largamente diffusa nella letteratura scientifica, basata sui profili di velocità operativa. I risultati acquisiti sono dettagliatamente illustrati nel Capitolo 4 dove si osserva dalla Tabella 11 che il valore medio del tasso di decelerazione è pari a $0,70 \text{ ms}^{-2}$, mentre quello di accelerazioni pari a $0,68 \text{ ms}^{-2}$. La Tabella illustra, altresì, che il valore medio del tronco L_d percorso in decelerazione è pari a 115 metri, ripartendosi mediamente per il 60% sul rettilineo di approccio - curva, a partire dalla sezione d'inizio - curva, e per il restante 40% sulla medesima curva; il tronco L_a percorso in accelerazione si sviluppa mediamente per 130 metri, ripartendosi per il 51% sul rettilineo di allontanamento –

curva, a partire dalla sezione di fine - curva, e per il restante 49% sulla medesima curva circolare.

In realtà, quando il tracciato stradale presenta lunghezze dei rettifili di approccio – curva inferiore a 69 m (60% di 115 m) e sviluppo delle curve circolari inferiore a 47 m (40% di 115 m), non è più possibile adottare un valore medio del tasso di decelerazione pari a $0,70 \text{ ms}^{-2}$, né una ripartizione percentuale del 60% e 40% del tronco L_{ad} tra rettilineo e curva. Analogamente quando esistono rettifili di allontanamento – curva con sviluppo inferiore a 66 m (51% di 130 m) e curve circolari estese meno di 64 m (49% di 130 m), non è più concepibile adottare un valore medio del tasso di accelerazione pari a $0,68 \text{ ms}^{-2}$, né una ripartizione percentuale del 51% e 49% del tronco di transizione L_a tra rettilineo e curva. In tali circostanze si adottano i tassi proposti al § 4.3.2.2 ove il campione delle misure utili è suddiviso in classi in base ai vincoli geometrici sussistenti.

L'analisi dei dati ha rivelato, tuttavia, che il reale comportamento di guida degli utenti, nella fase di approccio ed allontanamento - curva, può differire dalle ipotesi semplificatrici adottate, cioè di moto uniforme lungo le transizioni.

I differenti valori dei tassi di decelerazione ed accelerazione, acquisiti in corrispondenza dei diversi siti sulle sei strade oggetto d'analisi durante la prima fase della ricerca, hanno suggerito che un valore medio costante del tasso per tutte le curve circolari, pur essendo di facile applicazione, non è propriamente coerente con le reali variazioni di velocità attinte dagli utenti in fase di approccio ed allontanamento – curva.

Un modello di previsione dei tassi, al contrario, consente di catturare le reali variazioni di velocità da sito a sito, e perfezionare il valore finale.

Sono state, di conseguenza, proposte, in prima analisi, regressioni multiple non lineari, applicando l'ordinario metodo dei minimi quadrati secondo l'algoritmo di Gauss – Newton con espansione in serie di Taylor. I modelli possono essere impiegati in alternativa ai tassi costanti, ma richiedono un perfezionamento con un incremento, nella fase di sviluppo futuro della ricerca, della dimensione del campione coinvolto ed un'analisi ancor più dettagliata delle variabili impiegate. L'utilizzo di valori costanti associati ai tassi, come da § 4.3.1 e § 4.3.2, rende di più agevole costruzione il profilo delle velocità operative ed è, quindi, da preferirsi in circostanze disagevoli ai modelli. Con riferimento alle misure di decelerazione, il campione è stato ripartito in tre classi in base al valore misurato, per ciascun elemento curvilineo circolare, del CCR_s , in gon/km: $CCR_s < 320 \text{ gon/km}$, $320 \text{ gon/km} < CCR_s < 635 \text{ gon/km}$, ed infine $CCR_s > 635 \text{ gon/km}$.

La definizione di un modello di previsione del tasso di decelerazione, preceduta da un controllo statistico dei siti adoperati, è avvenuta per $CCR_s < 320 \text{ gon/km}$ con L_{RP}

> 78 m, ed $320 \text{ gon/km} < \text{CCRs} < 635 \text{ gon/km}$ con $L_{RP} > 50$ m.

La calibrazione, invece, di un modello di previsione del tasso di accelerazione, è stata preceduta da un controllo statistico delle misure, ed ha riguardato i soli siti con $L_{RP} > 283$ m.

Dopo aver identificato in prima analisi e per ciascun elemento curvilineo circolare la posizione e lo sviluppo delle transizioni, secondo quanto chiarito in precedenza, sono stati calibrati, con le restanti misure utili, i modelli di previsione delle V_{85} , in km/h, su rettilineo e curva orizzontale.

Due modelli predittivi sono stati formulati per i rettilineari: il primo riguardante lunghezze del rettilineo inferiori a 500 m ed il secondo associato a lunghezze maggiori di 500 m.

Due modelli predittivi sono stati, poi, formulati per gli elementi curvilinei circolari, rispettivamente per curve appartenenti a tronchi geometrici stradali con un tasso di variazione medio di curvatura maggiore e minore di 240 gon/km .

I modelli calibrati, con coefficiente di determinazione maggiore del 70%, evidenziano una forte relazione tra la velocità operativa misurata e diverse caratteristiche del tracciato stradale di *tipo geometrico*, come il tasso di variazione di curvatura, la dimensione della sezione trasversale, lo sviluppo dell'elemento geometrico, il raggio di curvatura, e di *tipo non geometrico*, come la presenza d'intersezioni e la densità di accessi privati per chilometro.

Ciascun modello restituisce, per senso di marcia, un valore di V_{85} , in km/h, per ogni generica posizione individuata sul tronco stradale, sia essa in rettilineo o in curva.

Per caratterizzare, tuttavia, la qualità del risultato restituito dal modello di previsione, è stato associare al misurando V_{85} un grado di incertezza media derivante dalla propagazione dell'indeterminatezza di cui sono affette le variabili d'ingresso.

L'incertezza stimata è tipo composta ed è stata valutata con una procedura di agevole comprensione ed applicazione ripresa dalla UNI CEI ENV 13005 [32].

I modelli sono stati, in seguito, validati, cioè sono stati applicati a due strade extraurbane ad unica carreggiata non appartenenti al campione di calibrazione ma dotate di caratteristiche geometriche, funzionali e di traffico assimilabili alle prime. La procedura ha comportato la valutazione di tre indicatori statistici sintetici che hanno confermato la correttezza delle equazioni di regressioni (37) (38) (39) (40), restituendo un ridotto scostamento dei valori predetti da quelli rilevati.

Un profilo continuo delle velocità operative può, a questo punto, esser tracciato sulle strade extraurbane a singola carreggiata in condizioni di flusso libero, localizzate in piano e prive di raccordi planimetrici di transizione, seguendo i successivi steps:

- a) Posizionamento e valutazione dei tronchi di transizione L_d e L_a per ciascun elemento curvilineo circolare, secondo quanto indicato ai paragrafi 4.3 e 4.4; si ricorda che in assenza di anomalie geometriche è stato registrato:
- Sviluppo medio di L_d pari a 115 m
 - Sviluppo medio di L_a pari a 130 m
 - 60% di L_d sul rettilineo di approccio – curva a partire dalla sezione di inizio – curva
 - 40% di L_d sulla curva circolare dalla sezione d’inizio – curva
 - 51% di L_a sul rettilineo di allontanamento – curva a partire dalla sezione di fine – curva
 - 49% di L_a sulla curva circolare dalla sezione di fine – curva
- b) Definizione della velocità operativa predetta nella sezione iniziale e finale dei tronchi L_d e L_a secondo uno dei quattro modelli calibrati
- c) Valutazione della reale estensione dei tronchi L_d e L_a , in metri, per ciascun elemento curvilineo circolare, assumendo una condizione di moto uniforme lungo le transizioni ed applicando le seguenti equazioni (63) (64):

$$L_d = \frac{(V_{85_rettilineodiapproccio}^2 - V_{85_curva}^2)}{2 \cdot d} \cdot (3,6^{-2}) \quad (63)$$

$$L_a = \frac{(V_{85_rettilineodipartenza}^2 - V_{85_curva}^2)}{2 \cdot a} \cdot (3,6^{-2}) \quad (64)$$

dove

- $V_{85_rettilineodiapproccio}$ = Valore predetto di velocità operativa, in km/h, registrato in corrispondenza di una sezione sul rettilineo di approccio – curva, e stimato attraverso uno dei due modelli, opportunamente, calibrati al variare della lunghezza dell’elemento. Il valore di velocità da adottarsi nell’espressione (63) è il massimo predetto sul rettilineo d’ingresso – curva ad una distanza non superiore a 200 m da PC, come chiarito al Capitolo 4
- V_{85_curva} = Valore predetto di velocità operativa, in km/h, registrato in curva, e stimato attraverso uno dei due modelli calibrati al variare del CCR. Il valore di velocità da adottarsi nelle espressioni (63) (64) è il minimo stimato sull’elemento curvilineo circolare

- d = Misura del tasso di decelerazione, in ms^{-2} , stimata attraverso un valore costante, come mostrato al §4.3, o con modelli di previsione, come presentato al §4.4, a seconda delle circostanze e dei vincoli geometrici esistenti in sito
- a = Misura del tasso di accelerazione, in ms^{-2} , stimata attraverso un valore costante, come mostrato al §4.3, o con modelli di previsione, come presentato al §4.4, a seconda delle circostanze e dei vincoli geometrici esistenti in sito

- d) Se lo sviluppo dell'elemento curvilineo circolare si presenta inferiore alla combinazione delle lunghezze di transizioni in decelerazione ed accelerazione, eventualmente associate al sito, il guidatore non attingerà in curva una velocità costante
- e) Qualora i tronchi di transizione dovessero sovrapporsi all'interno della curva, la più piccola riduzione di velocità, dovuta a decelerazione od accelerazione, sarà selezionata ed associata al sito [5].

Una volta definita, pertanto, la reale zona di transizione per ciascuna curva circolare, è possibile costruire un profilo continuo delle velocità operative, adottando, secondo le caratteristiche geometriche, uno dei quattro modelli calibrati su rettilo e curva circolare, riportando al variare dell'ascissa curvilinea il corrispondente valore di V_{85} in km/h. Le Figure 59 e 60 illustrano un esempio della costruzione del profilo delle velocità operative, secondo la procedura innanzi chiarita, sulla S.P. 135 in dir 1 e dir 0.

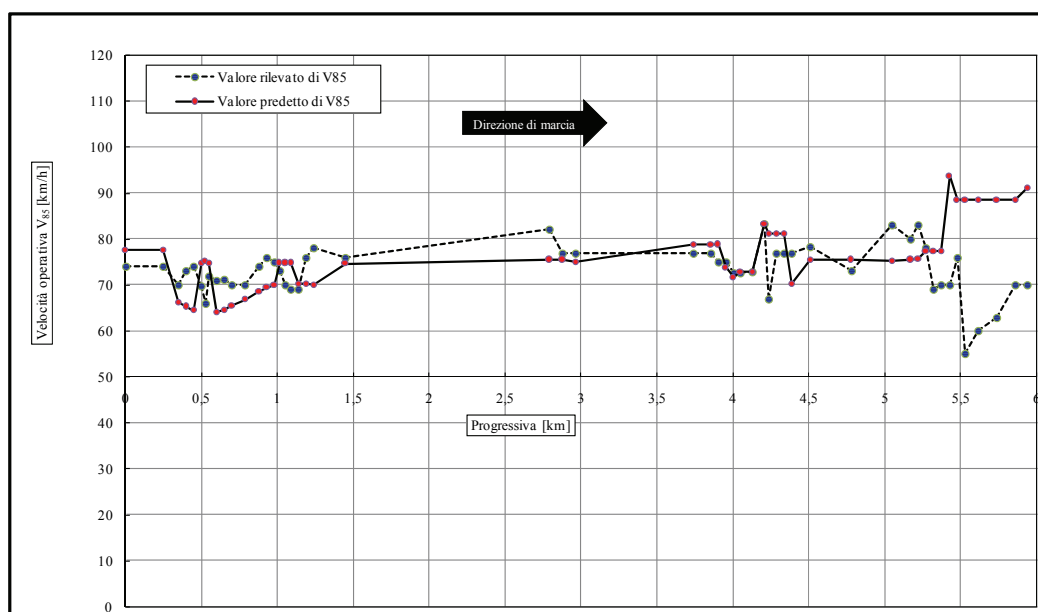


Figura 59_ Profilo di Velocità operativa su S.P.135 in direzione 0

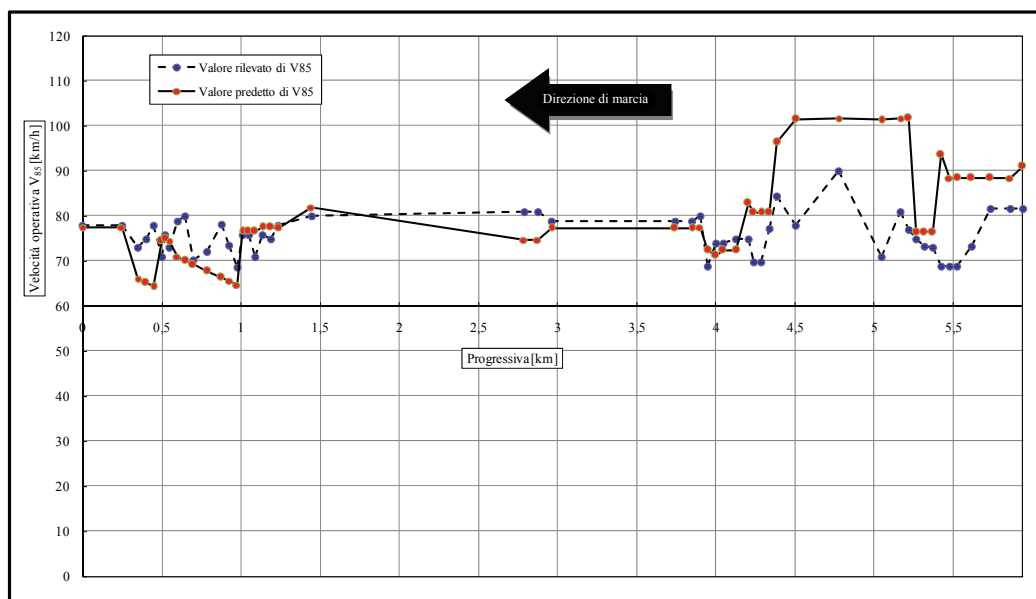


Figura 60_ Profilo di Velocità operativa su S.P.135 in direzione 1

I due grafici riportano la direzione del flusso veicolare attraverso una freccia, in ascissa le distanze, in km, ed in ordinata i valori della V_{85} predetta, con linea continua, e della V_{85} rilevata, con linea tratto e punto, in km/h.

La procedura illustrata può essere adoperata, di conseguenza, per le analisi di sicurezza su strade extraurbane esistenti a singola carreggiata in condizioni di flusso libero; infatti lo scostamento tra il valore di velocità operativa predetto, applicando i modelli calibrati in questa sede, e quello suggerito dagli Standard di progettazione Italiana [7], consentirebbe di evidenziare situazioni anomale e di pericolo.

Il modello di previsione calibrato della Congruenza dei tracciati stradali è un potente strumento da abbinare alla procedura illustrata; questo, riflettendo il reale e completo profilo delle velocità operative e la dispersione di queste rispetto alla media pesata lungo il tracciato, ne evidenzia la soluzione progettuale migliore. Soluzioni che apparentemente inducono medesimi costi, possono, infatti, provocare differenti benefici applicando l'equazione di previsione della congruenza.

Uno stato di avanzamento e perfezionamento dell'equazione (62) potrebbe comportare l'introduzione delle caratteristiche altimetriche oltre che planimetriche, un incremento del database e una verifica delle relazioni esistenti con il tasso d'incidentalità.

L'interesse futuro della ricerca si rivolge, anche, all'analisi delle differenze del comportamento di guida degli utenti su strade in presenza ed in assenza di clotoidi di transizione orizzontale, per un perfezionamento dei risultati raggiunti.

Riferimenti Bibliografici

- 1) Wooldridge, M., Fitzpatrick, K., Harwood, D., Potts, I. Elefteriadou, L. and D. Torbic, *Geometric design consistency on high-speed rural two-lane roadways*. NCHRP Report 502, TRB, National Research Council, 2003.
- 2) Indiana Department of Transportation, *Indiana Department of Transportation Design Manual, Part V - Road Design*, 1994.
- 3) American Association of State Highway and Transportation Officials., *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington, D.C. 2004.
- 4) Dell'Acqua G., *Relationships between design consistency and road safety*. Trasport Research Arena, Lyubjana, Slovenia, 2008.
- 5) Figueroa A. Medina, A.P. Tarko-School of Civil Engineering Purdue University-Joint Transportation Research Program Project No: C-36-10G File No: 8-3-7 SPR- 2661, Conducted in Cooperation with the Indiana Department of Transportation and the U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. *Reconciling speed limits with design speeds*-Final report fhwa/in/jtrp-2004/26-Purdue University West Lafayette, IN 47907 December 2004.
- 6) Figueroa Alberto Medina and Tarko Andrew P., *Speed Factors on Two-Lane Rural Highways in Free- Flow Conditions*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1912, Transportation Research Board of the National Academies, pp. 39-46., Washington, D.C., 2005.
- 7) Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade*, Italia, 2001.
- 8) Bozza al Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Norme per interventi di adeguamento delle strade esistenti*. Commissione per la predisposizione di nuove norme per gli interventi di adeguamento delle strade esistenti, Italia, 21 Marzo 2006.
- 9) Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Modifica del Decreto 5 novembre 2001*, n. 6792, recante «Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade», (Gazzetta ufficiale 25/06/2004 n. 147), Decreto 22/04/2004.
- 10) Fitzpatrick K., Elefteriadou L., Harwood D., Collins J., McFadden J., Anderson I., Krammes R., Irizarry N., Parma K., Bauer K., Passetti K., *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways*, Report FHWA-RD-99-171; FHWA U.S. Department of Transportation, 2000.

- 11) Krammes, R., *Design speed and operating speed in rural highway alignment design*, Transportation Research Record 1701, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, pp. 68-75, 2000.
- 12) McLean, J., *Driver speed behavior and rural road alignment design*. Traffic Engineering and Control, Vol. 22, No. 4, pp. 208-211, 1981.
- 13) Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M., Wooldridge, M. and Miaou, S., *Design Speed, Operating Speed and Posted Speed Practices*. NCHRP Report 504, TRB, National Research Council, 2003.
- 14) A. Marchionna, B. Crisman, R. Roberti, P. Perco, *Verifica Della Congruenza Di Un Tracciato Stradale Con Il Modello Most E Confronto Con Altre Procedure Adottate*, XI Convegno S.I.I.V. – Verona – 28–30 Novembre 2001.
- 15) Swiss Association of Road Specialists (Vereinigung Schweizerrischer Strassenfachleute VSS). *Swiss Norm SN 640 080 a/b, Speed as a Design Element of the horizontal alignment*, Zurich, Switzerland, 1981.
- 16) Guide to the Geometric Design of Rural Roads, *Rural Road Design*, Austroads, 1997.
- 17) Überprüfung der Relationstrassierung für Straßen der Kategoriengruppe A, FA 02. 153 R93E des Bundesministers für Verkehr, Zwischenbericht, Darmstadt, 1995.
- 18) Durth W., Lippold C., Research Contract FE n°6.2.2 191 of Federal Ministry of Transportation, Department of Road Design and Road Operation, *Adjustment of the German Design Guidelines for the Alignment (RAS L-1) to Newer Design Guidelines*, Technical University of Darmstadt, Federal Republic of Germany, 1993.
- 19) I.C.T.A.R.N., *Instruction sur les Conditions Techniques d'Amenagement des Routes Nationales*; Ministère de l'Equipement et du Logement; 1970.
- 20) SETRA Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, CETUR Centre d'Etudes des Transports Urbanis, *Sécurité des Routes et des Rues*, Bagneux, 1992.
- 21) Gambard J. M., Louah G., SETRA Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroute, *Vitesses pratiqués et Géométrie de la Route*, Parigi, 1986.
- 22) C.N.R. Bollettino Ufficiale, *Norme sulle caratteristiche geometriche delle strade extraurbane*, N° 78 del 28 Luglio 1980.

- 23) Anderson, I., Bauer, K., Harwood, D., Fitzpatrick, K. (1999). *Relationship to Safety of Geometric Design Consistency Measures*. 78th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, 10 - 14 January 1999.
- 24) Demiraslan, H., Chan, Y., Vidulich, M. (1998). *Visual Information Processing: Perception, Decision, Response Triplet*. Transportation Research Board n° 1631 - Driver and Vehicle Modeling, Washington 1998.
- 25) Bosurgi, G., D'Andrea, A. & Pellegrino, O., *The Influence of Human Factors in the Designing of Crest Curves*. 2nd International Symposium on Highway Geometric Design, Mainz 14-16 Giugno 2000.
- 26) Ottesen, J. and R.A. Krammes, *Speed-Profile Model for a Design Consistency Evaluation Procedure in the United States*, Transportation Research Record 1701, TRB, Transportation Research Council, Washington, D.C., 2000, pp. 76-85.
- 27) *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways*. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Millennium Edition. Washington, D.C., 2000.
- 28) Polus, A., Poe, C. and Mason Jr, J., *Review of international design speed practices in roadway geometric design*. International Symposium on Highway Geometric Design Practices, Conference Proceedings, Boston, Massachusetts, Chapter 5, pp. 1-8, 1995.
- 29) Bonneson, J., *Controls for horizontal curve design*, Transportation Research Record 1751, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, pp. 82-89, 2001.
- 30) Tarris, J., Poe, C., Mason Jr., J. and Goulias, K., *Predicting operating speeds on lowspeed urban streets: regression and panel analysis approaches*. Transportation Research Record 1523, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, pp. 46-54, 1996.
- 31) Lamm R., Choueiri E. M. *Recommendations for evaluating horizontal design consistency based on investigations in the state of New York*. In Transportation Research Record: journal of Transportation Research Board, n. 1122, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1987.
- 32) Norma UNI CEI ENV13005 “Guida all’espressione dell’incertezza di misura”, (traduzione italiana della norma internazionale ISO ENV 13005 “Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)”)

- 33) AA. VV. *Statistica degli incidenti stradali – anno 2006*. Istituto Nazionale di Statistica (Istat), Servizio Giustizia, in collaborazione con Automobile Club d'Italia (ACI), Roma, dicembre 2007.
- 34) Schurr, K., McCoy, P., Pesti, G. and Huff, R., *Relationship of design, operating, and posted speeds on horizontal curves of rural two-lane highways in Nebraska*, Transportation Research Record 1796, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, pp.60-71, 2002.
- 35) Polus, A., Fitzpatrick, K., and Fambro, D., *Predicting operating speeds on tangent sections of two-lane rural highways*, Transportation Research Record 1737, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, pp. 50-57, 2000.
- 36) Kanellaidis, G., Golias, J. and Efstathiadis, S., *Drivers' speed behavior on rural road curves*. Traffic Engineering and Control, Vol. 31, No. 7/8, pp. 414-415, 1990.
- 37) Islam, N. and Seneviratne, P., *Evaluation of design consistency of two-lane rural highways*, ITE Journal, Vol. 64, No. 2, pp. 28-31, 1994.
- 38) G. Dell'Acqua, T. Esposito, R. Lamberti, A. Balsano, D. Simonetti, *Studio Teorico-Sperimentale Delle Velocità Operative Su Strade Extraurbane A Due Corsie*, AIPCR, 2006.
- 39) Cardoso J. L., *Relations between accident frequency and speed consistency in Portuguese two-lane/two-way highways links*, International Symposium on Highway Geometric Design Practices, Conference Proceedings, Boston, Massachusetts, August 30 - September 1, 1995.
- 40) Andueza P. J., *Mathematical Models of Vehicular Speed on Mountain Roads*, In Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, n. 1701, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000.
- 41) Bella F. *The evaluation of Design Consistency, Predicting Models of Operating Speed on Three-Dimensional Alignment from Tests on Driving Simulator*, 3rd International Symposium on Highway Geometric Design, Chicago, U.S.A., 2005.
- 42) Crisman B., Marchionna A., Perco P., Roberti R., *Operating Speed Prediction Model for Two-Lane Rural Roads*, Proceedings of the 2nd SIIV International congress, Firenze, 2004.
- 43) Crisman B., Marchionna A., Perco P., Roberti R., *Operating Speed Prediction Model for Two-Lane Rural Roads*, 3rd International Symposium on Highway Geometric Design, Chicago, U.S.A., 2005.

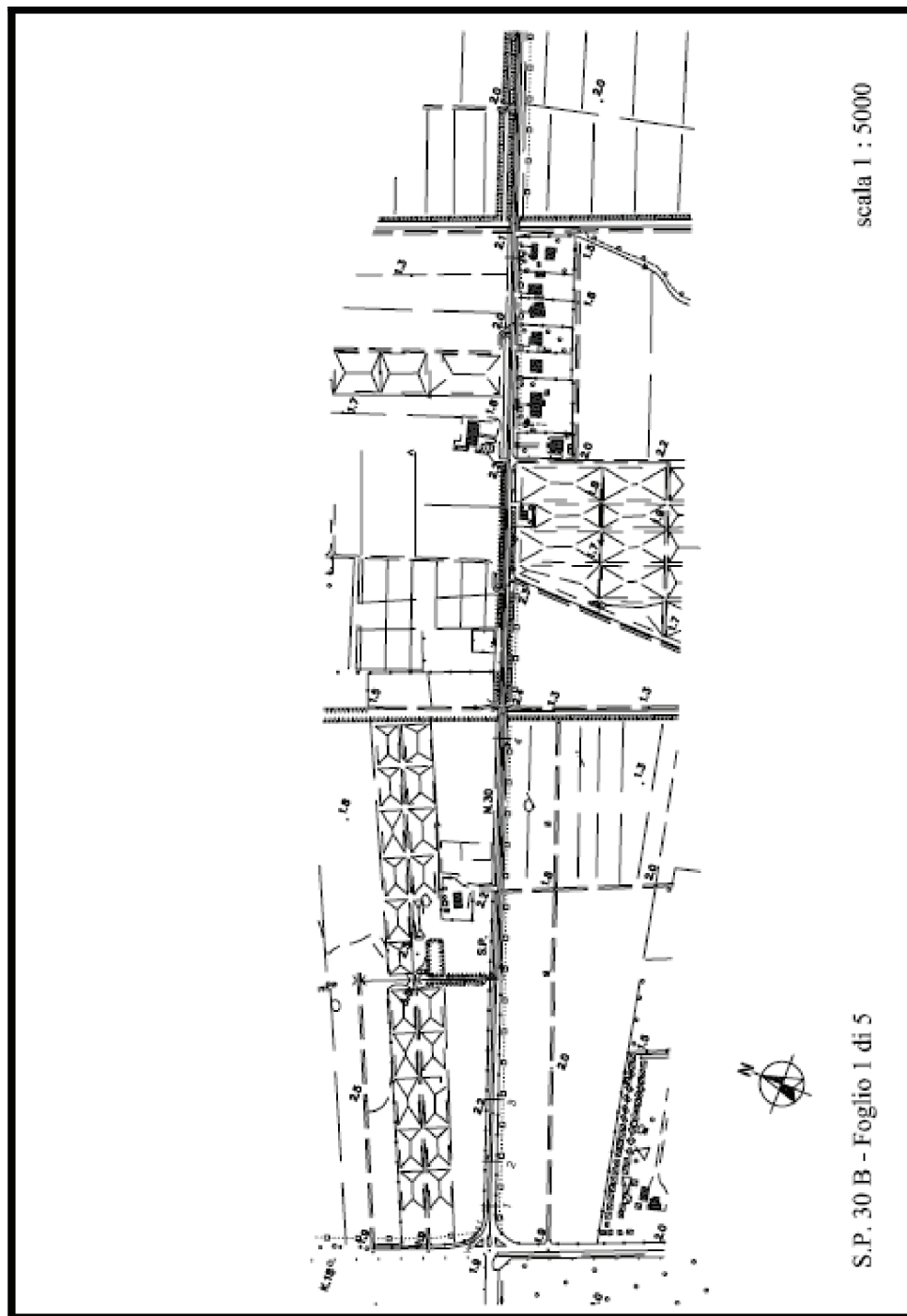
- 44) Marchionna A. and Perco P. *Operating Speed-Profile Prediction Model for Two-Lane Rural Roads in the Italian Context*. International Conference Road Safety and Simulation RSS Rome, Italy, 2007 7,8,9th November 2007.
- 45) P. Perco, *Influence of the General Character of the Horizontal Alignment on the Operating Speed of Two-Lane Rural Roads*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 2008.
- 46) Wilson T.D., Road Safety by Design. Journal of the Institute of Highway Engineers, vol. 15, 1968, pp. 23-33.
- 47) Collins K.M., Krammes R.A., *Preliminary Validation of a Speed- Profile Model for Design Consistency Evaluation*, Transportation Research Record, No. 1523; Transportation Research Board; National Research Council; Washington D.C, 1996.
- 48) McFadden J., Elefteriadou L., *Evaluating Horizontal Alignment Design Consistency of Two-Lane Rural Highway: Development of New Procedure*, Transportation Research Record, No. 1737; Transportation Research Board; National Research Council; Washington D.C., 2000.
- 49) Hirsh M., *Probabilistic Approach to Consistency in Geometric Design*, Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers ASCE, Vol. 113, n°3, pp.268-276, 1987.
- 50) Bin Nie and Yasser Hassan, *Modeling Driver Speed Behavior on Horizontal Curves of Different Road Classifications*, (Manuscript No. 2007-0782). Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, January 21-25, 2007.
- 51) Taragin A., *Driver Performance on Horizontal Curve*, Public Roads, vol. 28 n°2, pp. 21-39, 1954.
- 52) Fitzpatrick, K. and J.M. Collins, *Speed Profile Model for Two-Lane Rural Highways*, Transportation Record 1737, TRB, Transportation Research Council, Washington, D.C., pp.42-49, 2000.
- 53) Karl A. Passetti and Daniel B. Fambro, *Operating Speeds on Curves with and without Spiral Transitions*, Transportation Research Record 1658, Paper No. 99-1467, 1999.
- 54) Setra, Cete, *La vitesse pratiquée ou V_{sa} : Formules de calcul*, Juin 2008

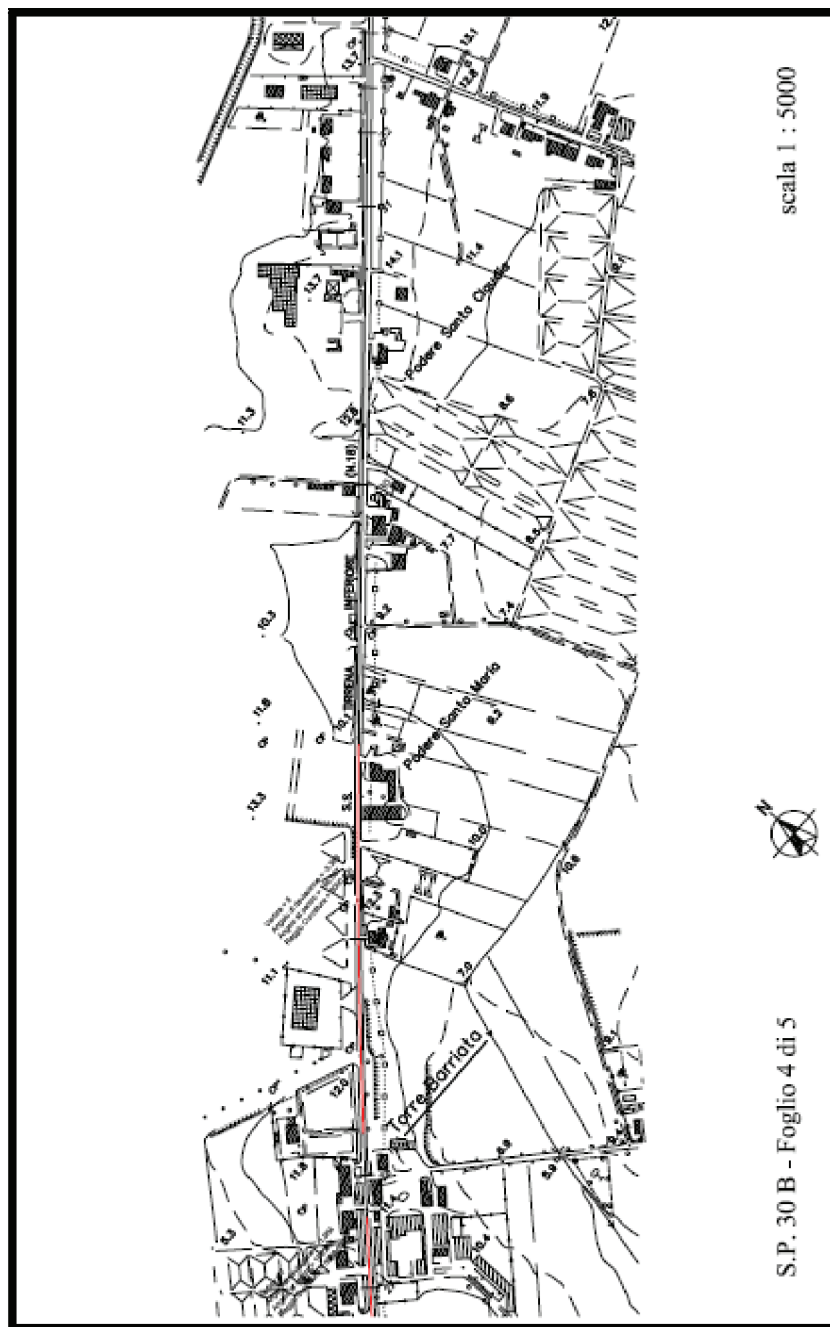
- 55) AA. VV., *Design Standard TD 9/93 Highway Link Design*, Department of Transport, London, 1993.
- 56) Bevilacqua A., Di Mino G., Nigrelli J., *An Experimental Investigation on the Relationship Between Speed and Road Geometry*, Atti del XIV Convegno Nazionale SIIV, Firenze, 2004.
- 57) Kerman J. A., et al., *Effects of road curvature on vehicle/driver behaviour*, Report by the Transportation Research Group for the Department of Transport, University of Southampton, 1982.
- 58) Krammes R. et al., *Horizontal Alignment Design Consistency for Rural Two-Lane Highways*, Report FHWA-RD-95-034. FHWA, U.S. Department of Transportation, 1995.
- 59) Holmquist C., *Changes in Speeds of Vehicles on Horizontal Curves*, Report 104, National Road Research Institute, Sweden, 1970.
- 60) Lamm R., E.M. Choueiri, J.C. Hayward, A. Paluri, *Possible Design Procedure To Promote Design Consistency in Highway Geometric Design on Two-Lane Rural Roads*, Transportation Research Record, No. 1195, Transportation Research Board; National Research Council, Washington D.C., pp. 111-122, 1988.
- 61) Krammes R.A., R.Q. Brakett, M.A. Shaffer, J.L. Ottesen, I.B. Anderson, K.L. Fink, K.M. Collins, O.J. Pendleton, C.J. Messer, *Horizontal Alignment Design Consistency for Two-Lane Highways*, Report FHWA-RD-94-034, FHWA, U.S. Department of Transportation, 1995.
- 62) Lamm R., E.M. Choueiri, J.C. Hayward. *Tangent as an Independent Design Element*. Transportation Research Record, No. 1195, Transportation Research Board; National Research Council, Washington D.C., pp. 123-131, 1988.
- 63) Perco P., A. Robba, *Evaluation of the Deceleration Rate for the Operating Speed-Profile Model*, Proceedings of the 3rd International SIIV Congress, Bari, Italy, 2005.
- 64) Perco P. Crisman B. Robba A. Roberti R., *Deceleration Model for Two-Lane Rural Roads*, Advances in Transportation Studies. An International Journal, n. 11 , Aracne, Roma, Aprile 2007, pp. 19-32.
- 65) Bella, F., *Assumptions of Operating Speed-Profile Models on Deceleration and Acceleration Rates: Verification in the Driving Simulator*, In Transportation Research Board of the National Academies , TRB, Washington, D.C., January 13-17,2008.

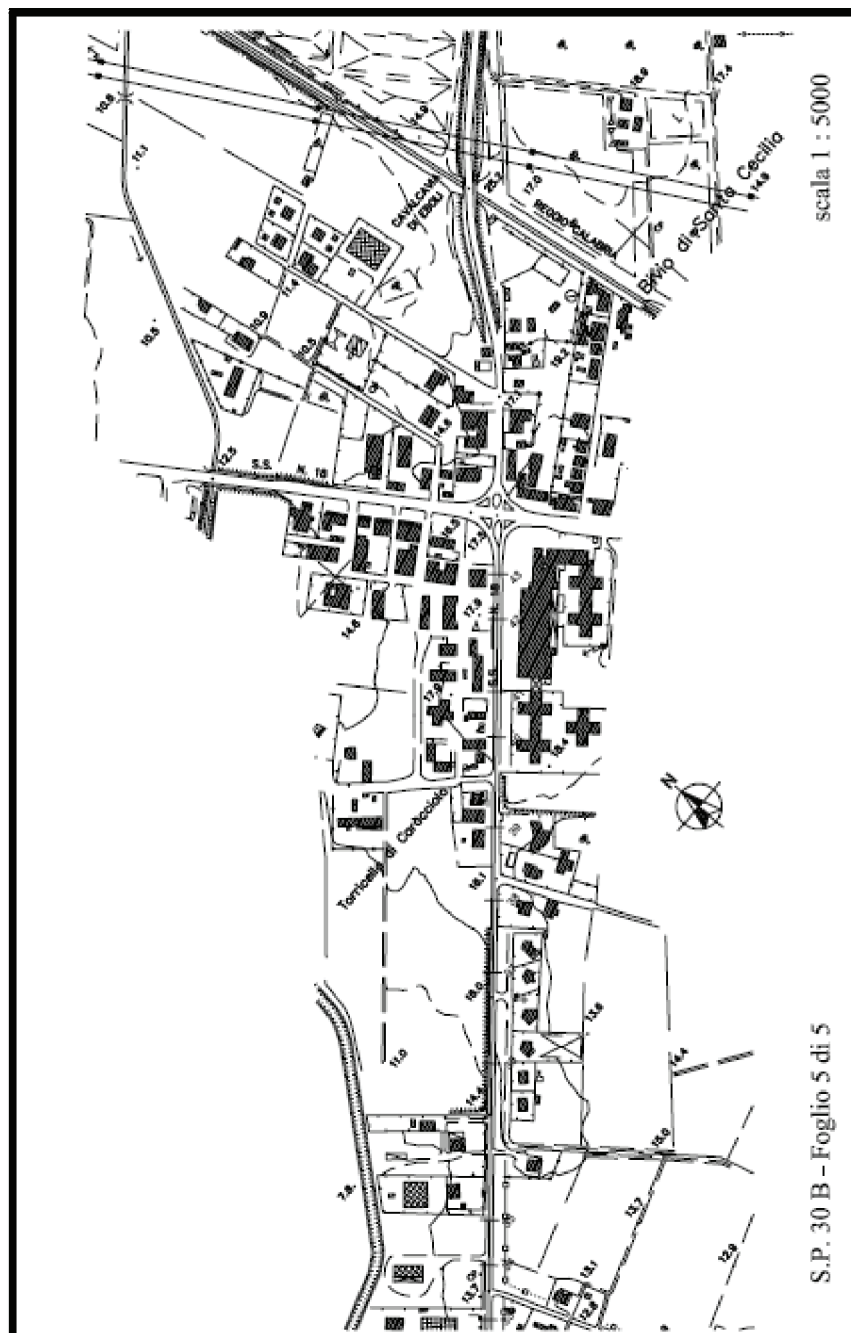
- 66) Figueroa A.M. and Tarko A.P., *Free-Flow Speed Changes in the Vicinity of Horizontal Curves*, 3rd International Symposium on Highway Geometric Design, Chicago, Illinois, June 29 - July 2, 2005, Transportation Research Board, TRB, 2005, pp. 1-19.
- 67) AA. VV., *Nuovo Codice della Strada*, D.Lgs. 30-04-1992, n. 285, Ministero dei Trasporti e delle Infrastrutture, 1992.
- 68) Leonardi S., Canale S., *Condizionamenti indotti dalle intersezioni a raso sulla viabilità extraurbana*. 2004, su www.stradelandia.it.
- 69) Erto P., *Probabilità e Statistica per le Scienze e l'ingegneria (terza edizione)*, McGraw Hill, 2008
- 70) Ventsel E. S., *Teorija verojatnostej*, Edizioni Mir, Mosca, 1983.
- 71) Lamm R., Psarianos B., Mailaender T., *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1999.
- 72) Polus A. and C. Matter – Habib, *New Consistency Model for Rural Highways and its Relationship to Safety*, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, May / June, 2004

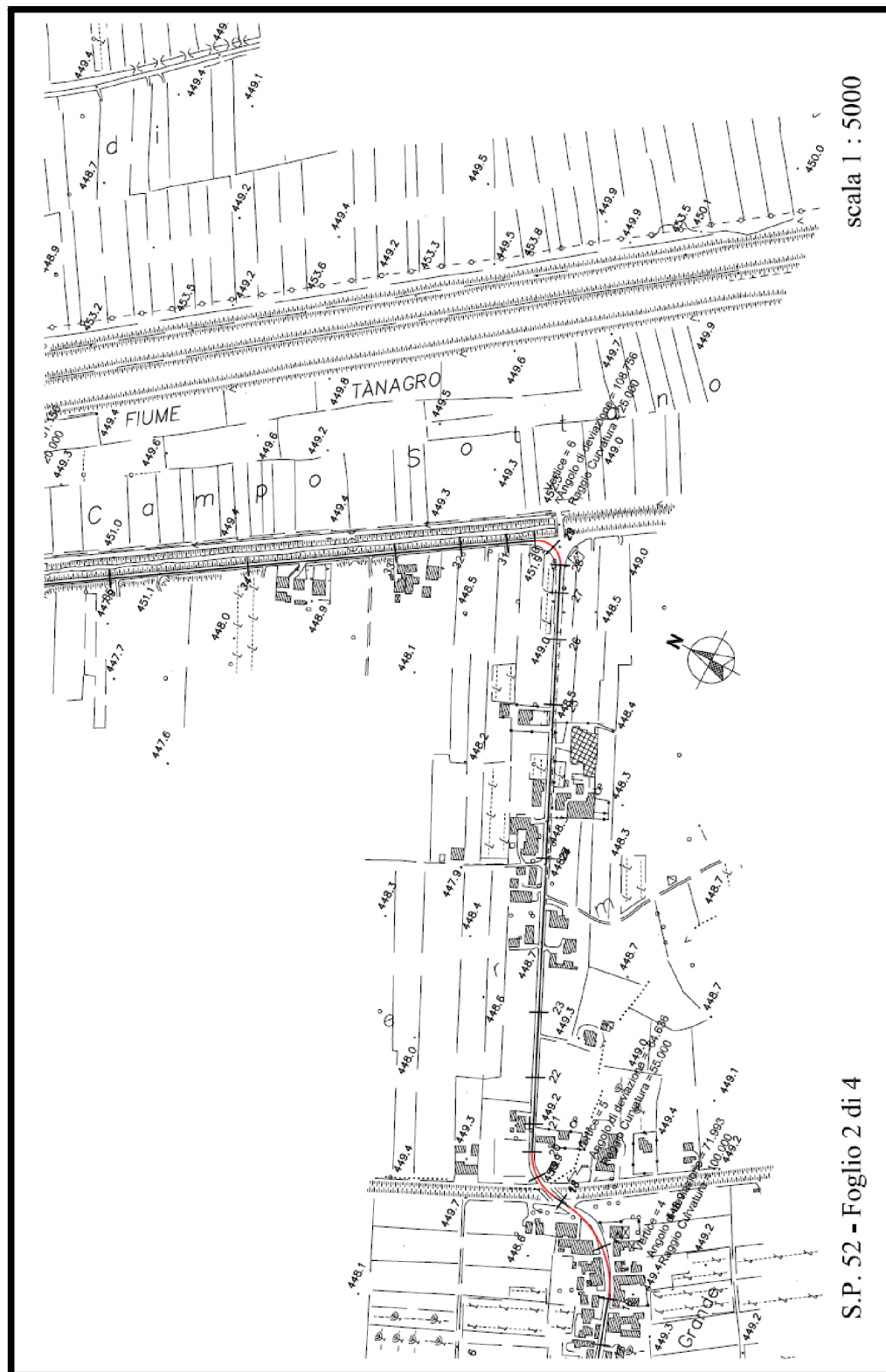
APPENDICE A

Stralci Cartografici







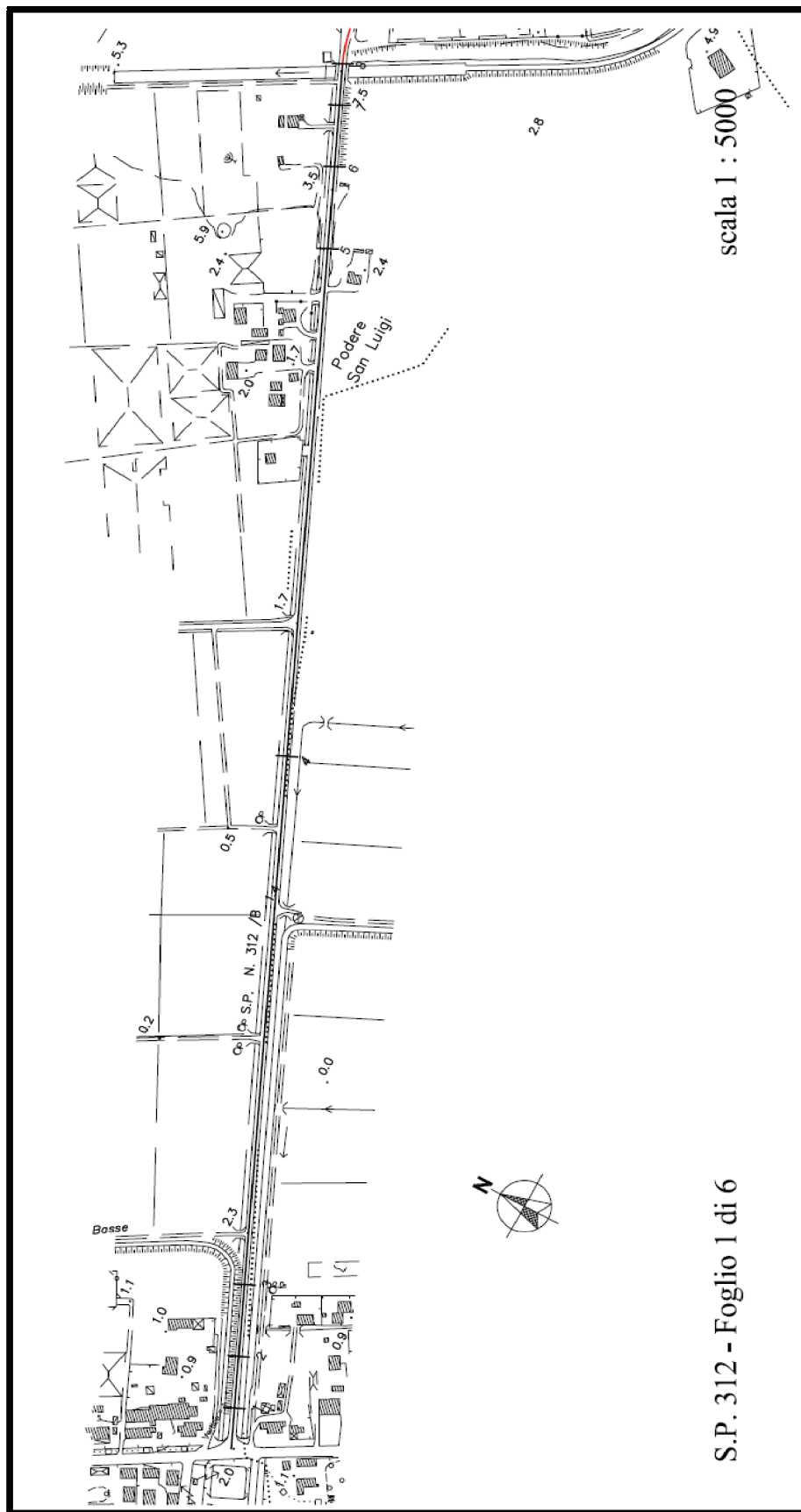


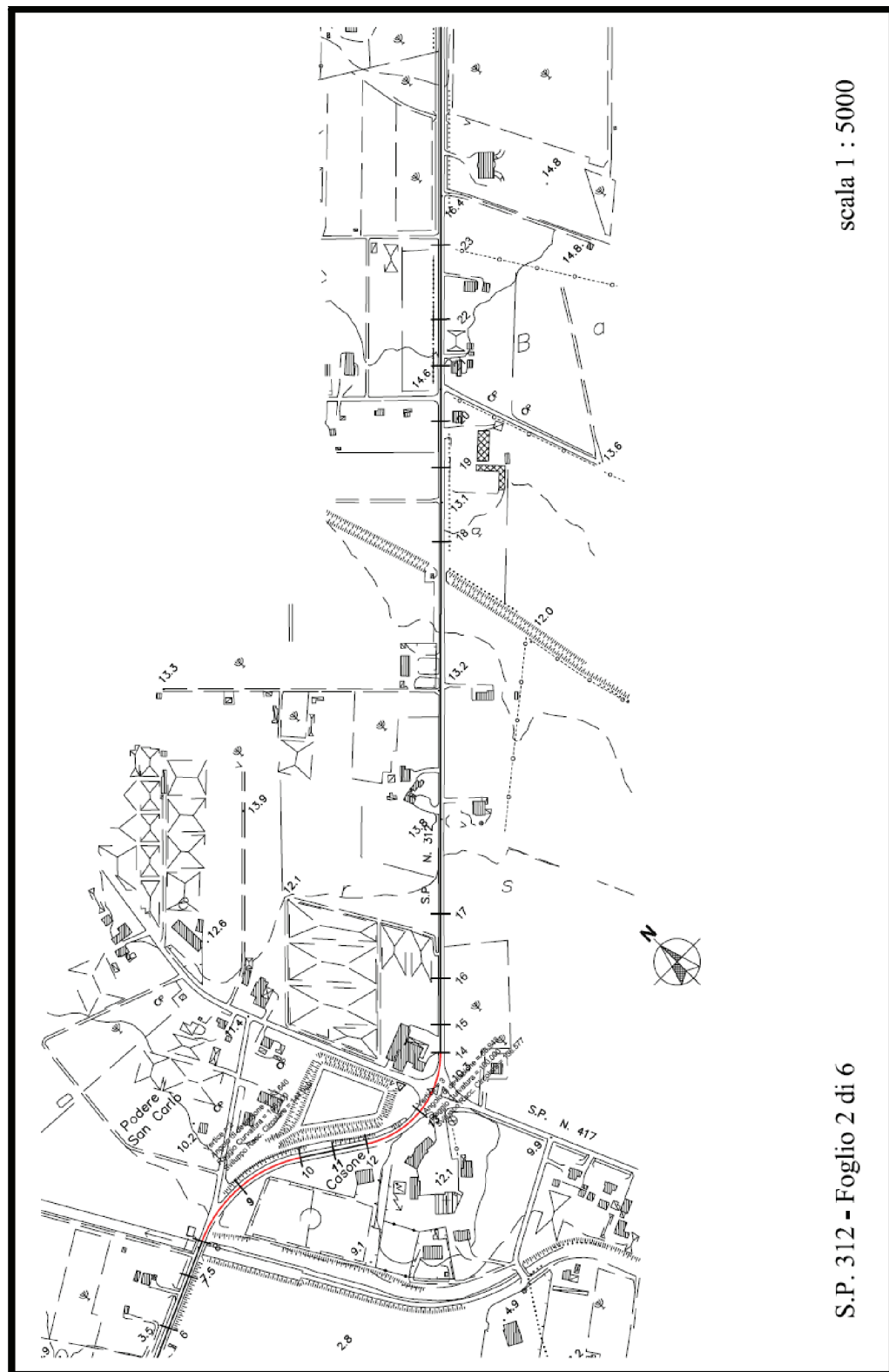
scala 1 : 5000

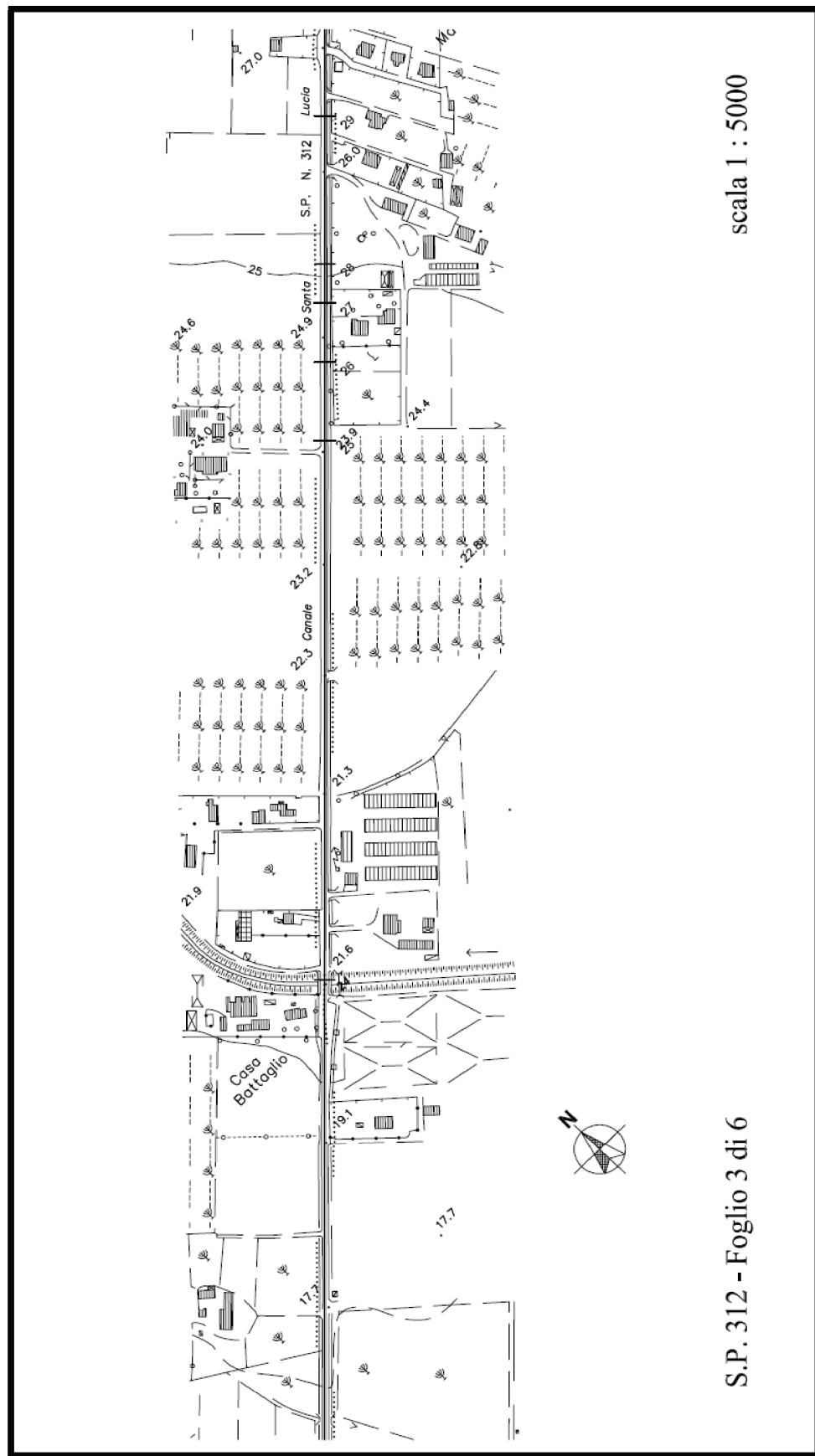


scala 1 : 5000





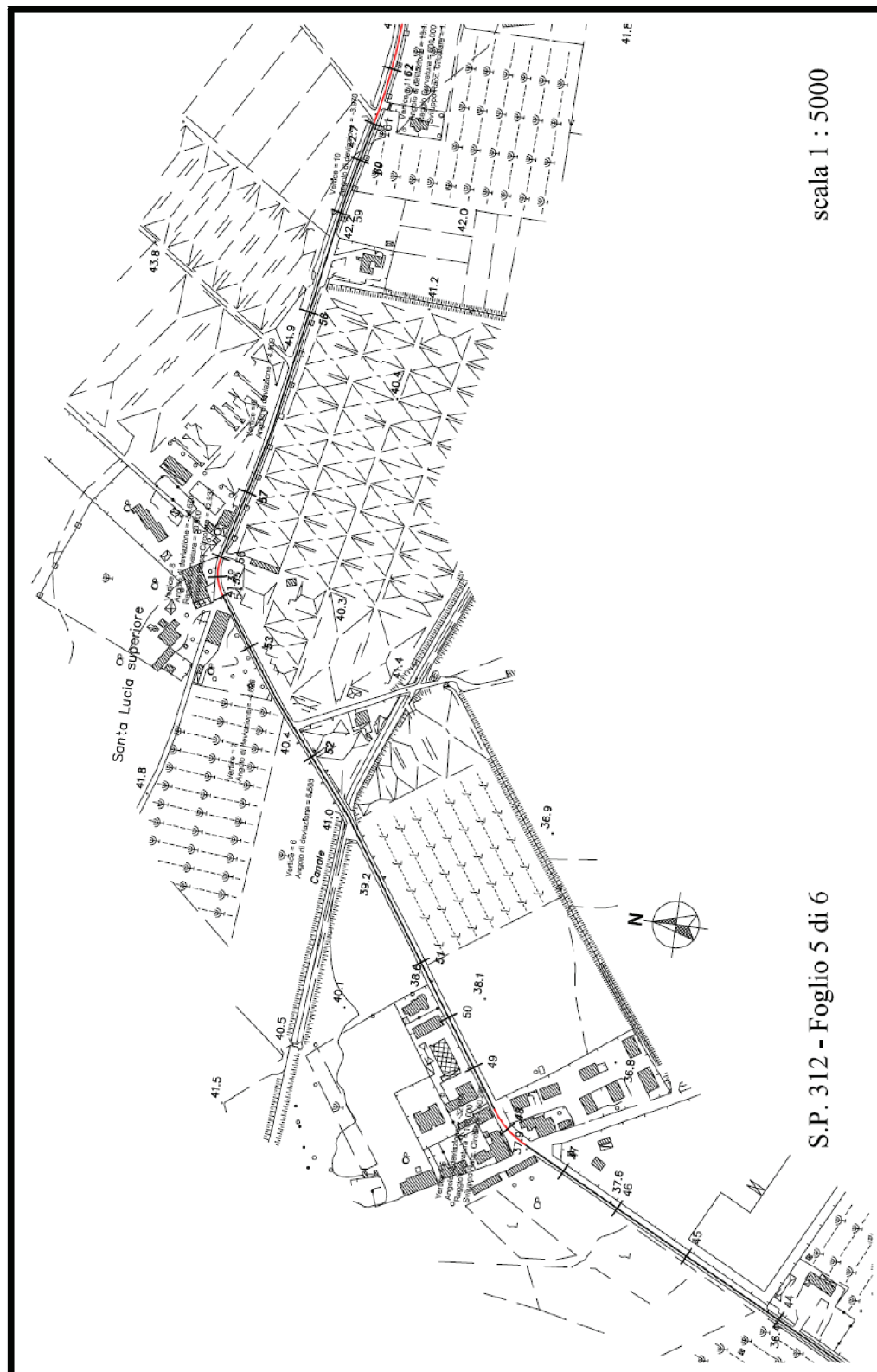


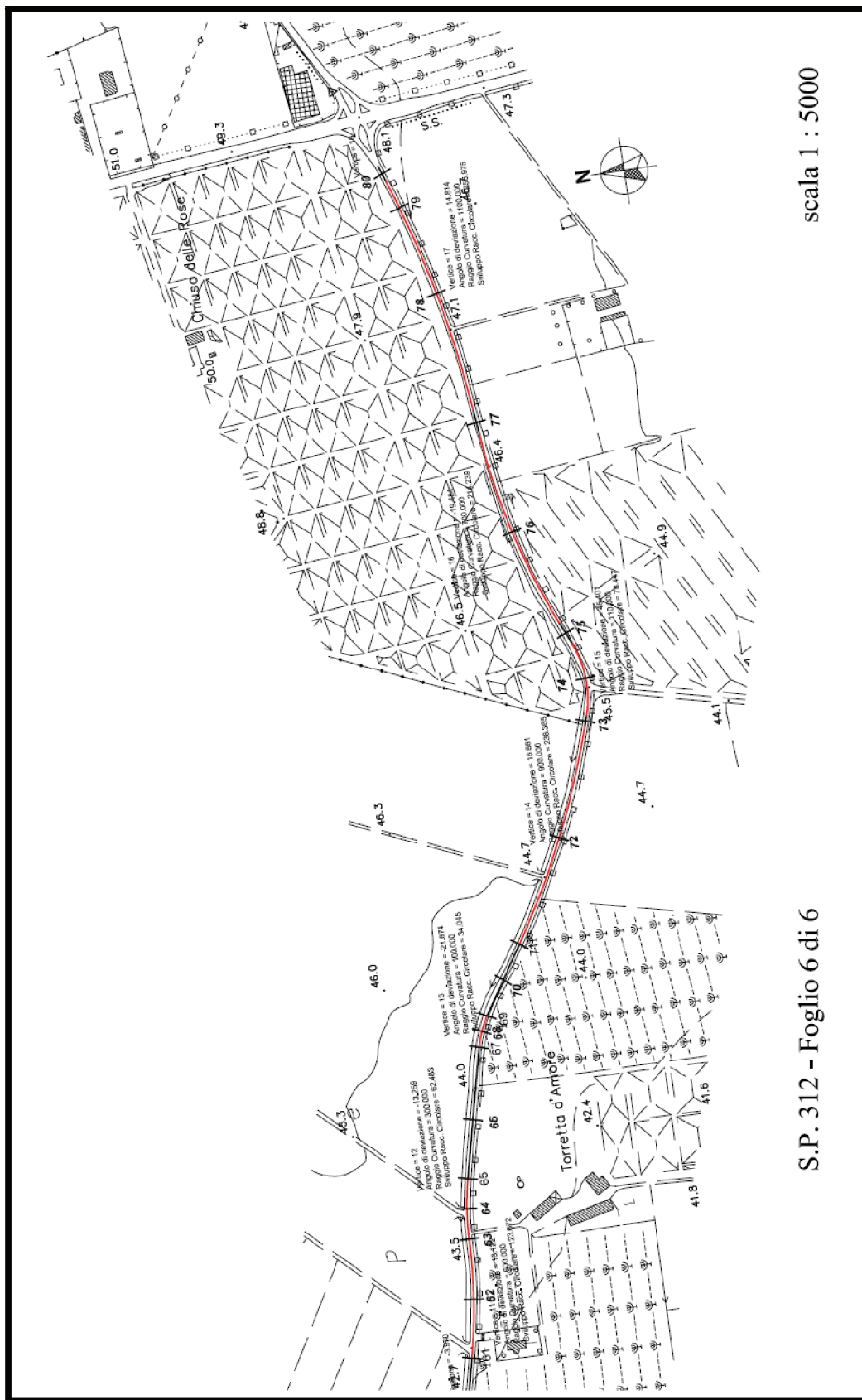


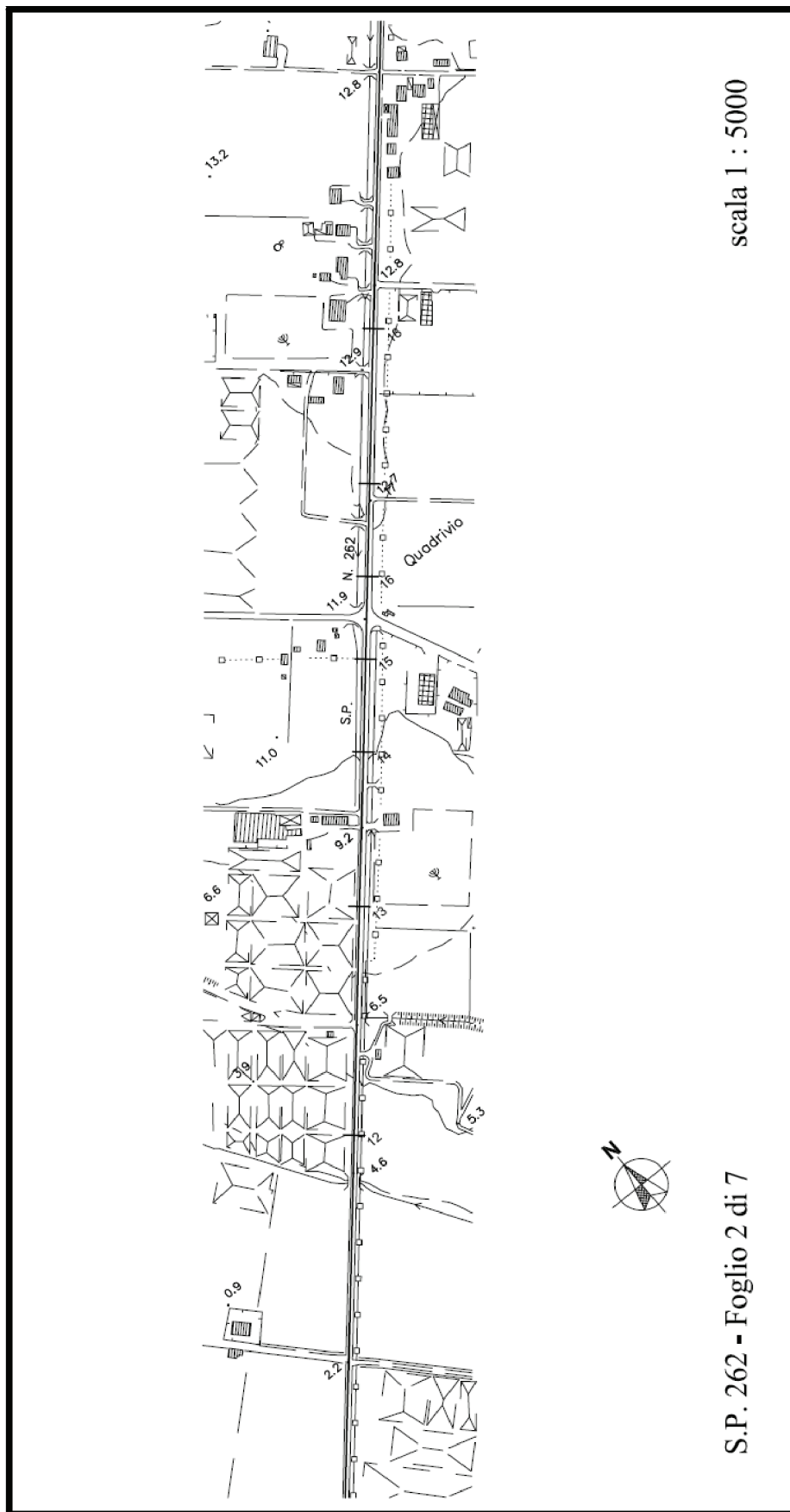
S.P. 312 - Foglio 3 di 6

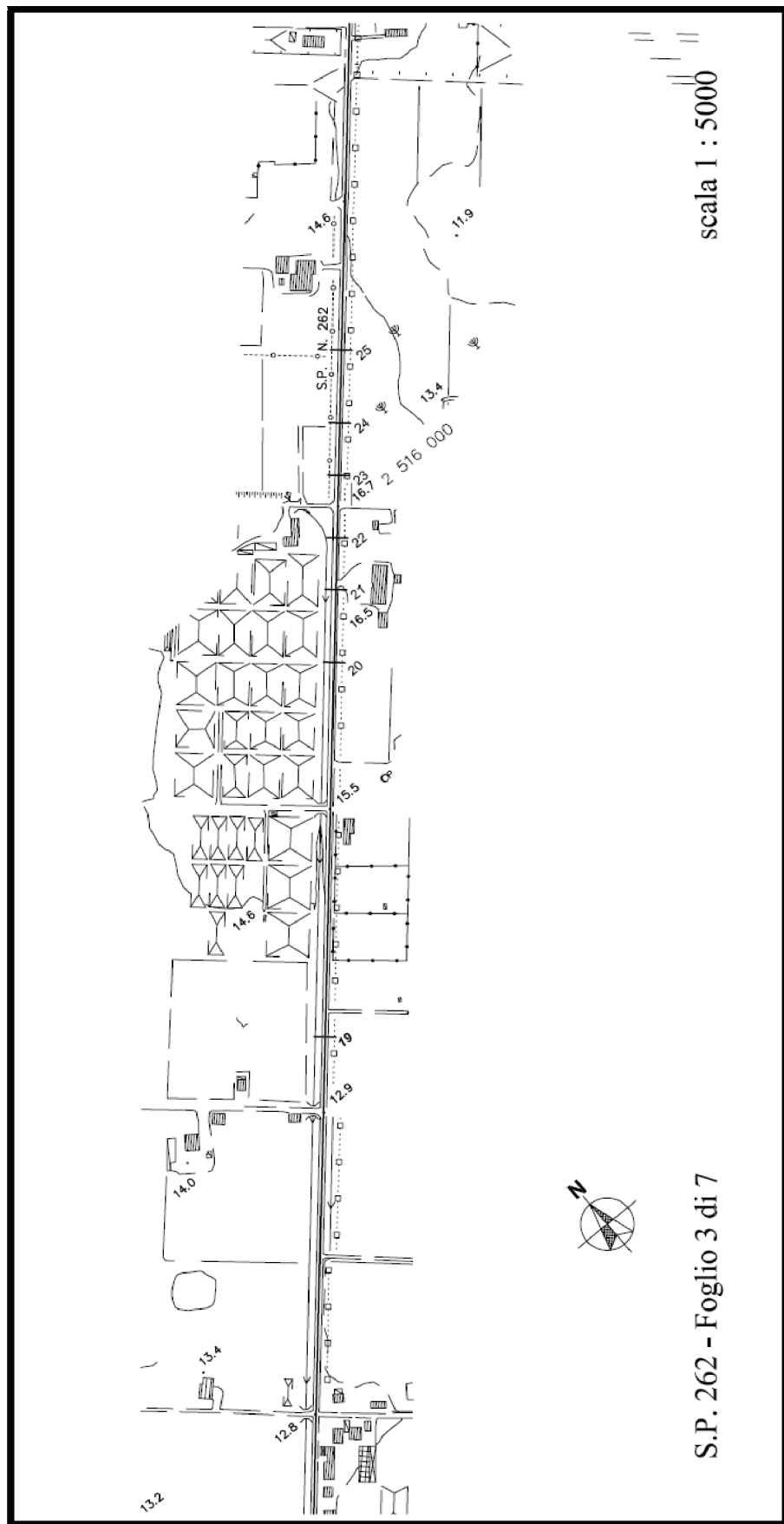
scala 1 : 5000

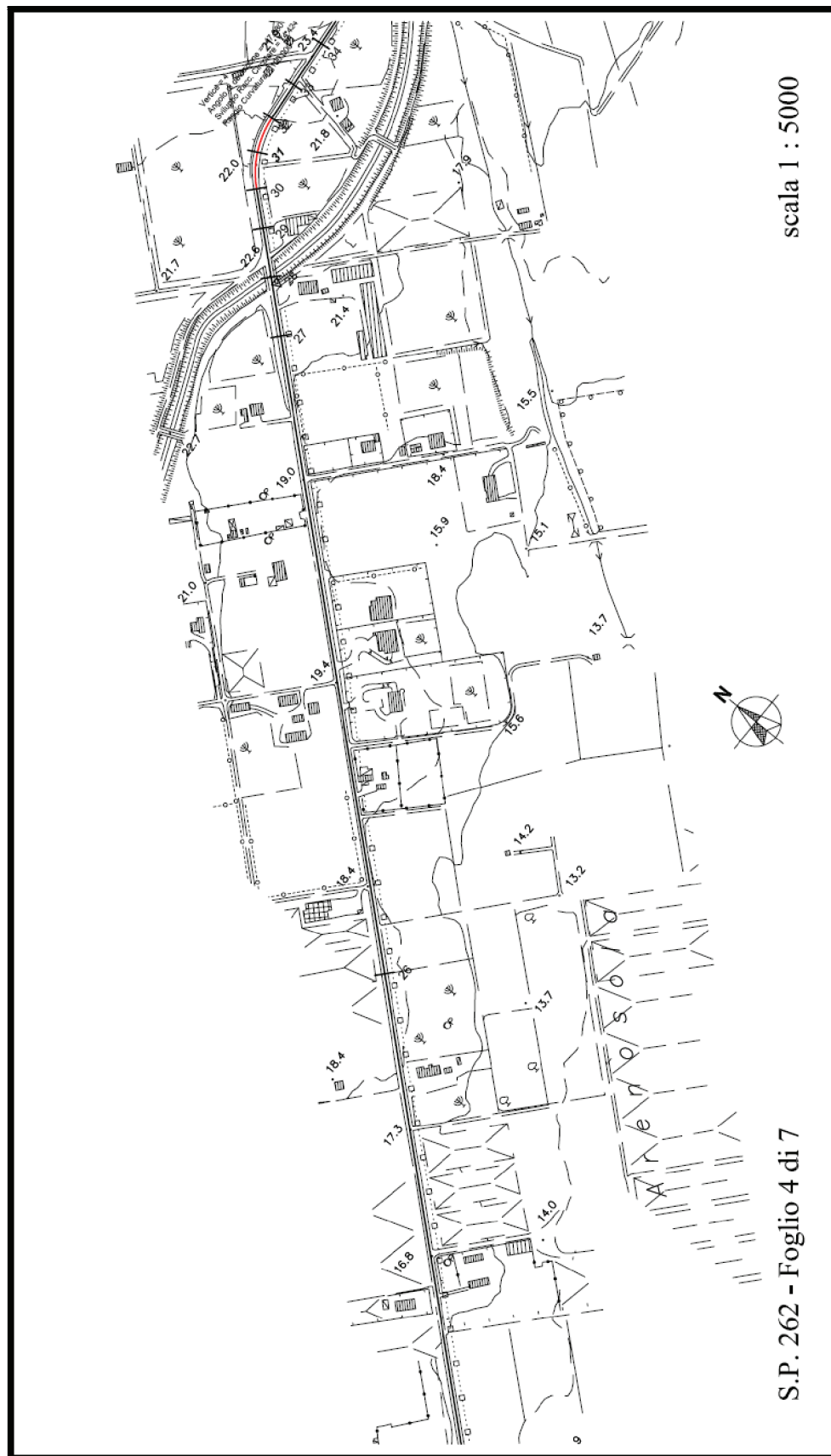


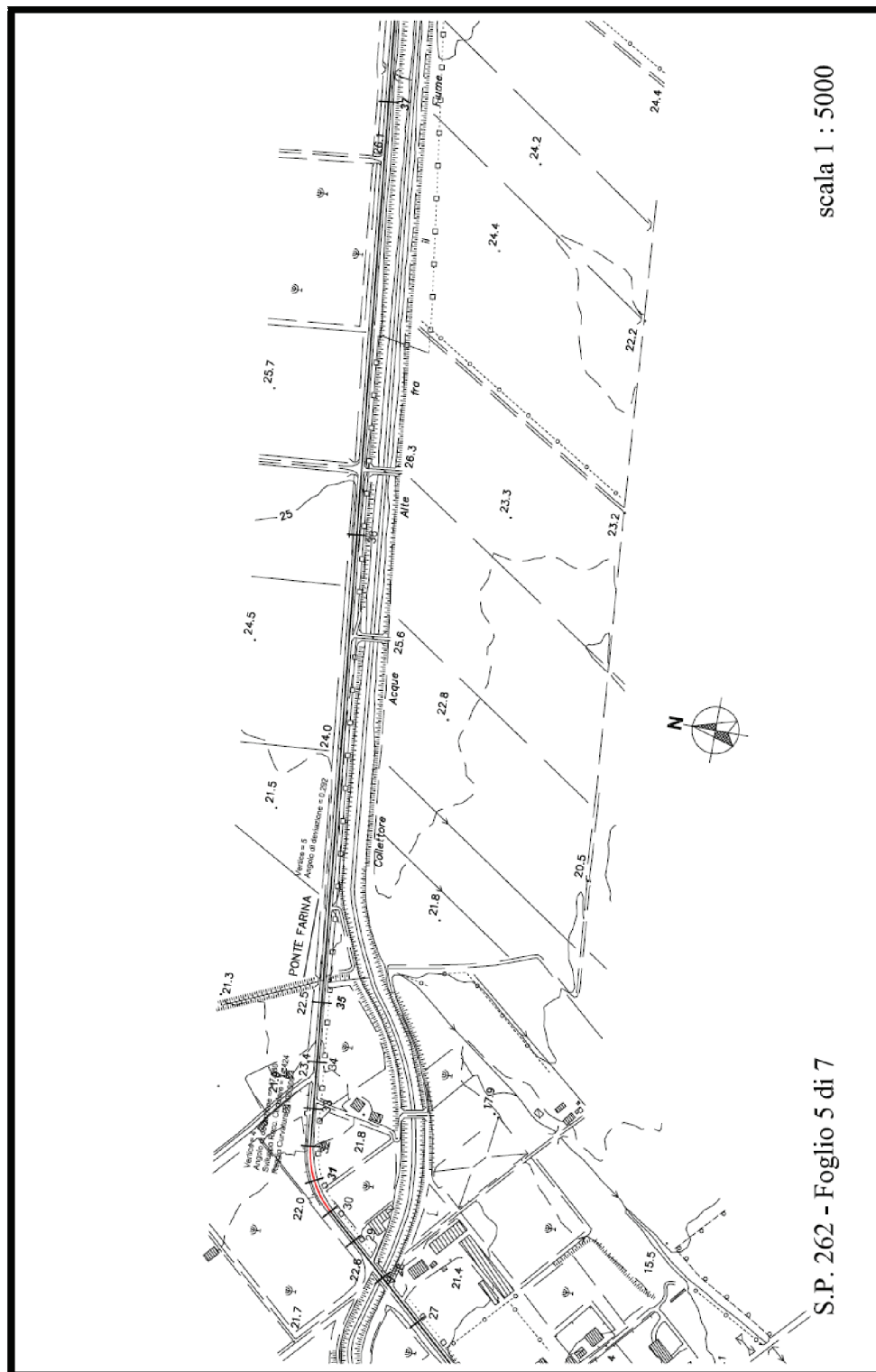


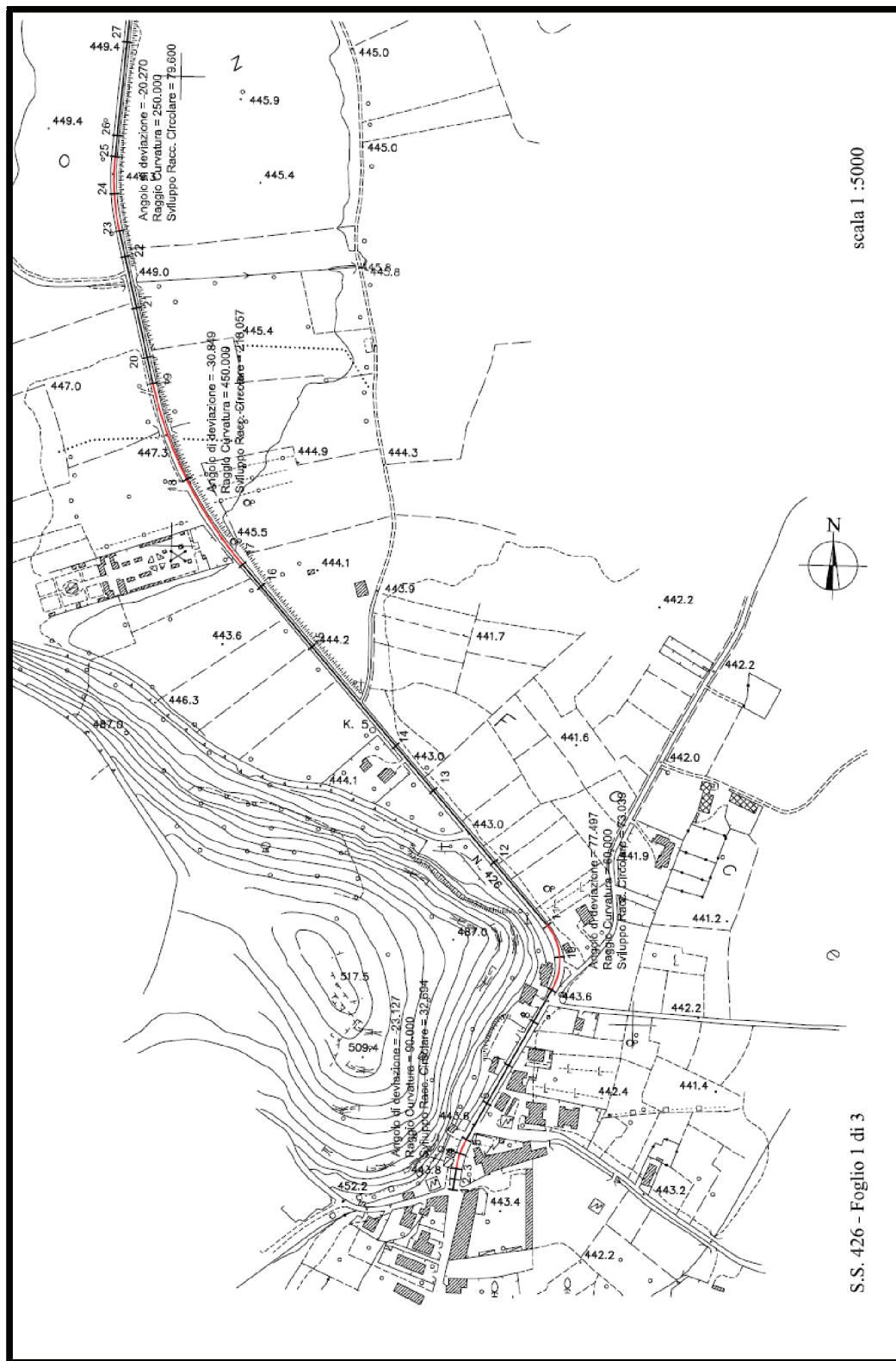






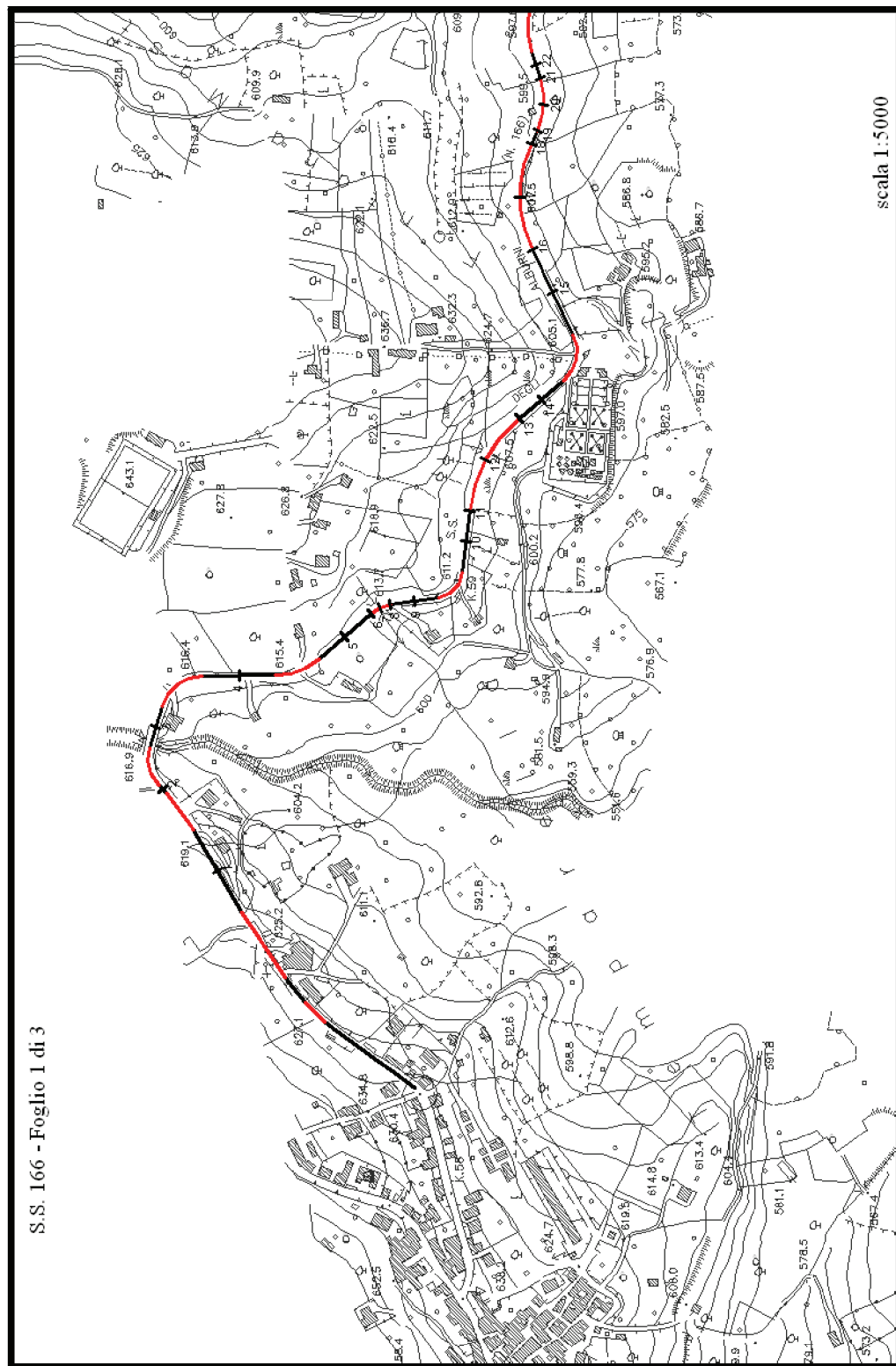


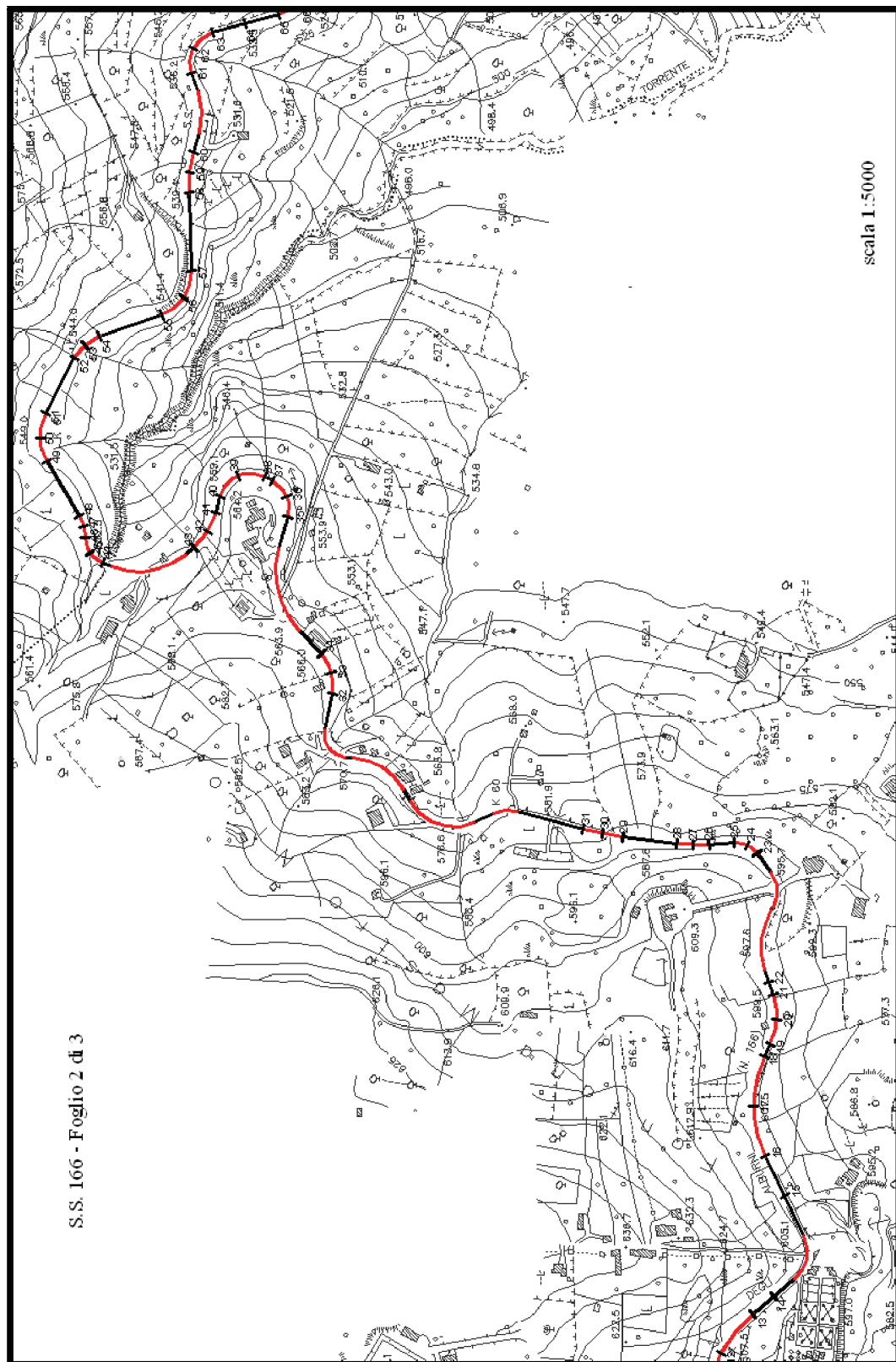


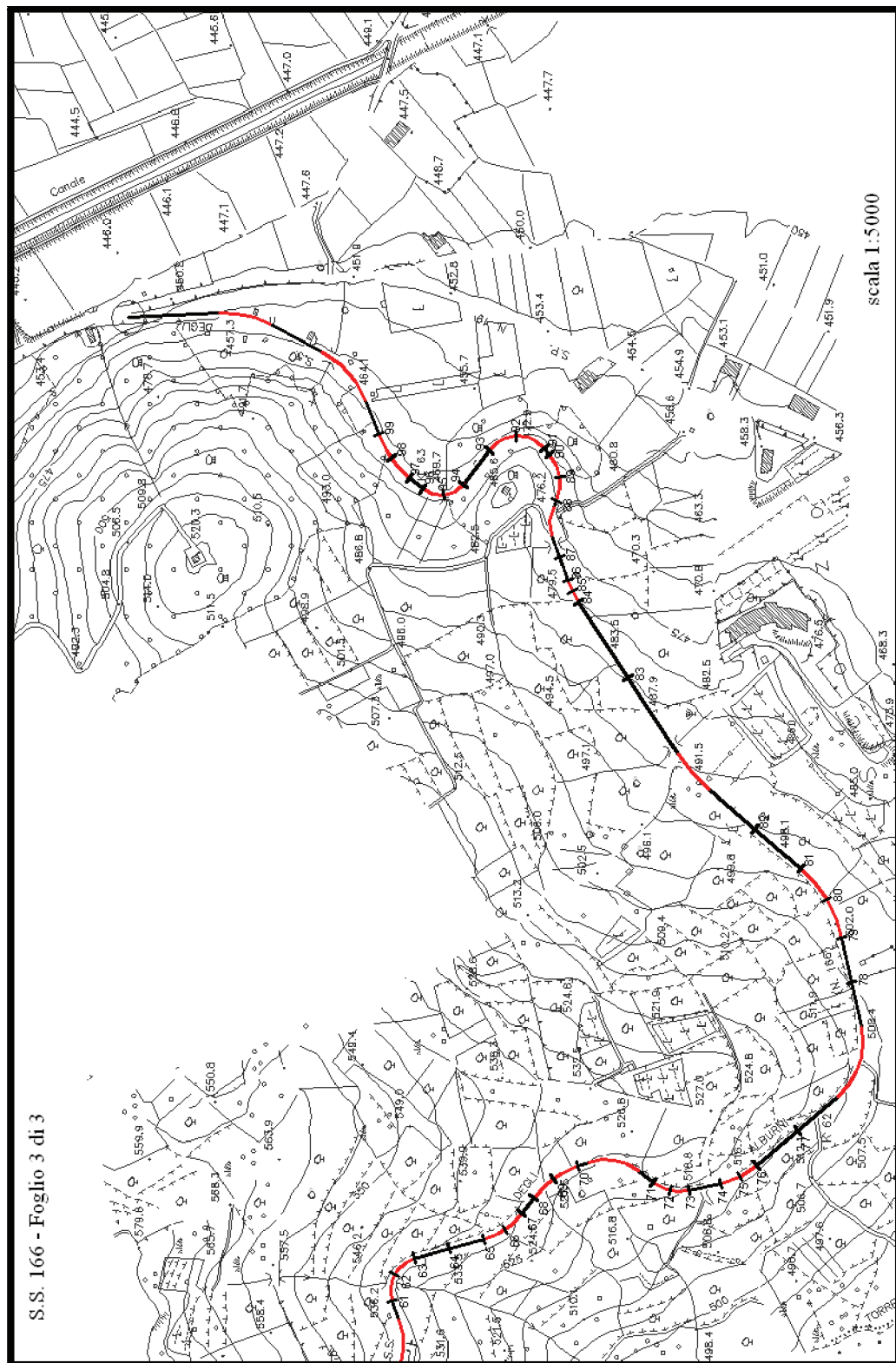


scala 1 :5000

S.S. 426 - Foglio 1 di 3







APPENDICE B

Valutazione Incertezza tipo composta ed estesa del misurando V_{85}

$$\begin{aligned} & (((((74.5786 - 0.563(x_5 - 9.13) + O[x_5 - 9.13]^2) - 5.63(x_4 - 0.19) + O[x_4 - 0.19]^2) + 0.32(x_3 - 59.73) + O[x_3 - 59.73]^2) - \\ & \quad 0.00930287(x_2 - 191.01) + O[x_2 - 191.01]^2) + 0.0047(x_1 - 2709.32) + O[x_1 - 2709.32]^2 \end{aligned}$$

```
dx1 = FullSimplify[{D[G, x1]] ;; {D[G, x1]^2}]
{0.0047 + O[x1 - 2709.32]^1] ;; {0.00002209 + O[x1 - 2709.32]^1]}
```

$$\begin{aligned} \mathbf{dx3} = & \text{FullSimplify}[\{\mathbf{D}[\mathbf{G}, \mathbf{x3}]\} ;; \{\mathbf{D}[\mathbf{G}, \mathbf{x3}]^2\}] \\ & \{((0.32 + \mathcal{O}[\mathbf{x3} - 59.73]^1) + \mathcal{O}[\mathbf{x2} - 191.01]^2) + \mathcal{O}[\mathbf{x1} - 2709.32]^2\} \\ & ;; \{((0.1024 + \mathcal{O}[\mathbf{x3} - 59.73]^1) + \mathcal{O}[\mathbf{x2} - 191.01]^2) + \mathcal{O}[\mathbf{x1} - 2709.32]^2\} \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} \mathbf{dx4} = & \text{FullSimplify}[\{\mathbf{D}[\mathbf{G}, \mathbf{x4}] \}; \{\mathbf{D}[\mathbf{G}, \mathbf{x4}]^2\}] \\ & \{((-5.63 + \mathcal{O}[\mathbf{x4} - 0.19]^1) + \mathcal{O}[\mathbf{x3} - 59.73]^2) + \mathcal{O}[\mathbf{x2} - 191.01]^2\} + \mathcal{O}[\mathbf{x1} - 2709.32]^2\} \\ & \{(((31.6969 + \mathcal{O}[\mathbf{x4} - 0.19]^1) + \mathcal{O}[\mathbf{x3} - 59.73]^2) + \mathcal{O}[\mathbf{x2} - 191.01]^2) + \mathcal{O}[\mathbf{x1} - 2709.32]^2\} \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} \text{dx5} = & \text{FullSimplify}\{(\text{D}[\text{G}, \text{x5}]) \;; (\text{D}[\text{G}, \text{x5}]^2)\} \\ & \{(((-0.563 + \text{O}[\text{x5} - 9.131]^1) + \text{O}[\text{x4} - 0.19]^2) + \text{O}[\text{x3} - 59.73]^2) + \text{O}[\text{x2} - 191.01]^2) + \text{O}[\text{x1} - 2709.32]^2\} \\ & \;; \{((0.316969 + \text{O}[\text{x5} - 9.131]^1) + \text{O}[\text{x4} - 0.19]^2) + \text{O}[\text{x3} - 59.73]^2) + \text{O}[\text{x2} - 191.01]^2) + \text{O}[\text{x1} - 2709.32]^2\} \end{aligned}$$

2 | Lmag500.nb

Costruzione della Matrice di Covarianza

```
Import["C:\\Documents and Settings\\Administrator\\Desktop\\matematica file\\mate rett maggiore 500.xls"]
```

[illegible]


```
v = {{3252., 200., 78., 0., 10.}, {3252., 200., 78., 0., 20.}, {3252., 200., 78., 0., 20.}, {3252., 200., 78., 0., 20.},
{3252., 200., 78., 0., 20.}, {3252., 200., 78., 1., 10.}, {3252., 200., 78., 1., 10.}, {3252., 200., 78., 1., 10.},
{3252., 200., 78., 1., 10.}, {2561.5, 280., 64., 1., 8.}, {2561.5, 280., 64., 0., 3.}, {2561.5, 280., 64., 0., 3.},
{2561.5, 280., 64., 0., 3.}, {2561.5, 280., 64., 0., 3.}, {2561.5, 280., 64., 0., 3.}, {2561.5, 280., 64., 0., 3.},
{2561.5, 280., 64., 0., 3.}, {2561.5, 280., 64., 0., 3.}, {704., 400., 72.8, 1., 14.}, {704., 400., 72.8, 1., 14.},
{704., 400., 72.8, 1., 14.}, {4699., 260., 48.1, 1., 11.}, {4699., 260., 48.1, 0., 11.}, {4699., 260., 48.1, 0., 8.},
{4699., 260., 48.1, 0., 8.}, {4699., 260., 48.1, 1., 8.}, {4699., 260., 48.1, 0., 11.}, {4699., 260., 48.1, 0., 11.},
{4699., 260., 48.1, 0., 12.}, {4699., 260., 48.1, 0., 12.}, {4699., 260., 48.1, 0., 12.}, {4699., 260., 48.1, 0., 12.},
{4699., 260., 48.1, 0., 12.}, {4699., 260., 48.1, 0., 12.}, {1725., 100., 71., 1., 12.}, {1725., 100., 71., 0., 4.},
{1725., 100., 71., 0., 4.}, {4674., 100., 63., 0., 11.}, {4674., 100., 63., 0., 8.}, {4674., 100., 63., 0., 8.},
{4674., 100., 63., 1., 8.}, {4674., 100., 63., 0., 11.}, {4674., 100., 63., 0., 11.}, {4674., 100., 63., 0., 12.},
{4674., 100., 63., 0., 12.}, {4674., 100., 63., 0., 12.}, {4674., 100., 63., 0., 12.}, {4674., 100., 63., 0., 12.},
{4674., 100., 63., 0., 12.}, {4674., 100., 63., 0., 12.}, {2827., 100., 40.1, 0., 14.}, {2827., 100., 40.1, 0., 10.},
{2827., 100., 40.1, 1., 10.}, {2827., 100., 40.1, 1., 10.}, {2827., 100., 40.1, 0., 10.}, {2827., 100., 40.1, 0., 9.},
{2827., 100., 40.1, 0., 9.}, {2827., 100., 40.1, 0., 9.}, {2827., 100., 40.1, 0., 9.}, {2827., 100., 40.1, 0., 8.},
{2827., 100., 40.1, 0., 8.}, {2827., 100., 40.1, 0., 8.}, {2827., 100., 40.1, 0., 8.}, {998.5, 200., 62., 0., 8.},
{998.5, 200., 62., 0., 8.}, {998.5, 200., 62., 0., 11.}, {998.5, 200., 62., 0., 11.}, {998.5, 200., 62., 1., 11.},
{715., 100., 35., 0., 11.}, {715., 100., 35., 0., 11.}, {715., 100., 35., 0., 3.}, {715., 100., 35., 0., 3.},
{715., 100., 35., 0., 3.}, {1330.5, 145., 58., 1., 6.}, {2791., 200., 72., 0., 14.}, {2791., 200., 72., 0., 10.},
{2791., 200., 72., 1., 10.}, {2791., 200., 72., 1., 10.}, {2791., 200., 72., 1., 10.}, {2791., 200., 72., 0., 10.},
{2791., 200., 72., 0., 9.}, {2791., 200., 72., 0., 9.}, {2791., 200., 72., 0., 9.}, {2791., 200., 72., 0., 9.},
{2791., 200., 72., 0., 9.}, {2791., 200., 72., 0., 8.}, {2791., 200., 72., 0., 8.}, {2791., 200., 72., 0., 8.},
{2791., 200., 72., 0., 8.}, {940., 100., 42., 0., 8.}, {940., 100., 42., 0., 8.}, {940., 100., 42., 0., 11.},
{940., 100., 42., 0., 11.}, {940., 100., 42., 1., 11.}, {533.5, 50., 44.6, 0., 11.}, {523., 250., 68., 0., 5.},
{523., 250., 68., 0., 5.}, {523., 400., 78., 0., 5.}, {523., 400., 78., 0., 5.}, {523., 400., 78., 0., 5.}, {523., 240., 74., 0., 6.}}
```

4 | Lmag500.nb

```
{{3252., 200., 78., 0., 10.}, {3252., 200., 78., 0., 20.}, {3252., 200., 78., 0., 20.}, {3252., 200., 78., 0., 20.},
{3252., 200., 78., 1., 10.}, {3252., 200., 78., 1., 10.}, {3252., 200., 78., 1., 10.}, {3252., 200., 78., 1., 10.}, {2561.5, 280., 64., 1., 8.},
{2561.5, 280., 64., 0., 3.}, {2561.5, 280., 64., 0., 3.}, {2561.5, 280., 64., 0., 3.}, {2561.5, 280., 64., 0., 3.}, {2561.5, 280., 64., 0., 3.},
{2561.5, 280., 64., 0., 3.}, {2561.5, 280., 64., 0., 3.}, {2561.5, 280., 64., 0., 3.}, {2561.5, 280., 64., 1., 3.},
{704., 400., 72.8, 1., 14.}, {704., 400., 72.8, 1., 14.}, {4699., 260., 48.1, 1., 11.}, {4699., 260., 48.1, 0., 11.},
{4699., 260., 48.1, 0., 8.}, {4699., 260., 48.1, 0., 8.}, {4699., 260., 48.1, 1., 8.}, {4699., 260., 48.1, 0., 11.},
{4699., 260., 48.1, 0., 11.}, {4699., 260., 48.1, 0., 12.}, {4699., 260., 48.1, 0., 12.}, {4699., 260., 48.1, 0., 12.},
{4699., 260., 48.1, 0., 12.}, {4699., 260., 48.1, 0., 12.}, {1725., 100., 71., 1., 12.}, {1725., 100., 71., 0., 4.},
{1725., 100., 71., 0., 4.}, {4674., 100., 63., 0., 11.}, {4674., 100., 63., 0., 8.}, {4674., 100., 63., 0., 8.},
{4674., 100., 63., 1., 8.}, {4674., 100., 63., 0., 11.}, {4674., 100., 63., 0., 11.}, {4674., 100., 63., 0., 12.},
{4674., 100., 63., 0., 12.}, {4674., 100., 63., 0., 12.}, {4674., 100., 63., 0., 12.}, {4674., 100., 63., 0., 12.},
{2827., 100., 40.1, 0., 14.}, {2827., 100., 40.1, 0., 10.}, {2827., 100., 40.1, 1., 10.}, {2827., 100., 40.1, 1., 10.},
{2827., 100., 40.1, 0., 10.}, {2827., 100., 40.1, 0., 9.}, {2827., 100., 40.1, 0., 9.}, {2827., 100., 40.1, 0., 9.}, {2827., 100., 40.1, 0., 8.},
{2827., 100., 40.1, 0., 8.}, {2827., 100., 40.1, 0., 8.}, {2827., 100., 40.1, 0., 8.}, {998.5, 200., 62., 0., 8.}, {998.5, 200., 62., 0., 11.},
{998.5, 200., 62., 0., 11.}, {998.5, 200., 62., 1., 11.}, {715., 100., 35., 0., 11.}, {715., 100., 35., 0., 11.},
{715., 100., 35., 0., 3.}, {715., 100., 35., 0., 3.}, {715., 100., 35., 0., 3.}, {715., 100., 35., 0., 3.}, {1330.5, 145., 58., 1., 6.},
{2791., 200., 72., 0., 14.}, {2791., 200., 72., 0., 10.}, {2791., 200., 72., 1., 10.}, {2791., 200., 72., 1., 10.}, {2791., 200., 72., 1., 10.},
{2791., 200., 72., 0., 10.}, {2791., 200., 72., 0., 9.}, {2791., 200., 72., 0., 9.}, {2791., 200., 72., 0., 9.}, {2791., 200., 72., 0., 9.},
{2791., 200., 72., 0., 9.}, {2791., 200., 72., 0., 8.}, {2791., 200., 72., 0., 8.}, {2791., 200., 72., 0., 8.}, {2791., 200., 72., 0., 8.},
{940., 100., 42., 0., 8.}, {940., 100., 42., 0., 8.}, {940., 100., 42., 0., 11.}, {940., 100., 42., 0., 11.}, {940., 100., 42., 1., 11.},
{533.5, 50., 44.6, 0., 11.}, {523., 250., 68., 0., 5.}, {523., 250., 68., 0., 5.}, {523., 250., 68., 0., 5.}, {523., 400., 78., 0., 5.},
{523., 400., 78., 0., 5.}, {523., 400., 78., 0., 5.}, {523., 400., 78., 0., 5.}, {523., 240., 74., 0., 6.}}
```

MatrixForm[Covariance[v]]

$$\begin{pmatrix} 2.09293 \times 10^6 & -20367.9 & -979.639 & -15.0917 & 1998.62 \\ -20367.9 & 7835.14 & 593.539 & 2.9593 & -67.5546 \\ -979.639 & 593.539 & 194.556 & 0.771098 & 2.43228 \\ -15.0917 & 2.9593 & 0.771098 & 0.156833 & 0.131068 \\ 1998.62 & -67.5546 & 2.43228 & 0.131068 & 13.9163 \end{pmatrix}$$

```

Import["C:\Documents and Settings\Administrator\Desktop\matematica file\lux L maggiore 500.xls"]
{{{20.124.3, 75.3378, 1.87073, 0.00150801, 0.13381}, {, , , }, {, , , },
  {, , , }, {, , , }, {, , , }, {, , , }, {, , , }, {, , , }, {, , , }, {, , , }, {, , , }, {, , , }}}
s = {20124.306428223917, 75.33784450939281, 1.870729412018192, 0.001508014017349342, 0.13381021284540706}
{20.124.3, 75.3378, 1.87073, 0.00150801, 0.13381}
u = {{s[[1]]}, {s[[2]]}, {s[[3]]}, {s[[4]]}, {s[[5]]}}
{{20.124.3}, {75.3378}, {1.87073}, {0.00150801}, {0.13381}}
f = {D[G, x1]^2, D[G, x2]^2, D[G, x3]^2, D[G, x4]^2, D[G, x5]}
{0.00002209 + O[x1 - 2709.32]^1, (0.0000865433 + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^2,
  ((0.1024 + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^2) + O[x1 - 2709.32]^2,
  (((31.6969 + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^2) + O[x2 - 191.01]^2) + O[x1 - 2709.32]^2,
  ((((-0.563 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^2) + O[x3 - 59.73]^2) + O[x2 - 191.01]^2) + O[x1 - 2709.32]^2}
s1 = primacomponenteprimomembroequazionegeneraleincertezza = f.u
{(((((0.615093 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^1)}
{D[G, x1], D[G, x1], D[G, x1], D[G, x1]}
{0.0047 + O[x1 - 2709.32]^1, 0.0047 + O[x1 - 2709.32]^1, 0.0047 + O[x1 - 2709.32]^1, 0.0047 + O[x1 - 2709.32]^1}
{D[G, x2], D[G, x3], D[G, x4], D[G, x5]}
{((-0.00930287 + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^2, ((0.32 + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^2) + O[x1 - 2709.32]^2,
  (((-5.63 + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^2) + O[x2 - 191.01]^2) + O[x1 - 2709.32]^2,
  ((((-0.563 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^2) + O[x3 - 59.73]^2) + O[x2 - 191.01]^2) + O[x1 - 2709.32]^2}
{2 * Covariance[v][[1, 2]], 2 * Covariance[v][[1, 3]], 2 * Covariance[v][[1, 4]], 2 * Covariance[v][[1, 5]]}
{-40.735.9, -1959.28, -30.1833, 3997.24}

```

6 | Lmag500.nb

```

primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza =
{D[G, x1], D[G, x1], D[G, x1], D[G, x1]} * {D[G, x2], D[G, x3], D[G, x4], D[G, x5]} *
{2 * Covariance[v][[1, 2]], 2 * Covariance[v][[1, 3]], 2 * Covariance[v][[1, 4]], 2 * Covariance[v][[1, 5]]}
{((1.78111 + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^1, ((-2.94675 + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^2) + O[x1 - 2709.32]^1,
  (((0.798682 + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^2) + O[x2 - 191.01]^2) + O[x1 - 2709.32]^1,
  ((((-10.5771 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^2) + O[x3 - 59.73]^2) + O[x2 - 191.01]^2) + O[x1 - 2709.32]^1}
S21 = primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[1]] +
primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[2]] +
primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[3]] +
primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[4]]
{((((-10.9441 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^1}
{D[G, x2], D[G, x2], D[G, x2]}
{((-0.00930287 + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^2,
  (-0.00930287 + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^2, (-0.00930287 + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^2}
{D[G, x3], D[G, x4], D[G, x5]}
{((0.32 + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^2) + O[x1 - 2709.32]^2,
  (((-5.63 + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^2) + O[x2 - 191.01]^2) + O[x1 - 2709.32]^2,
  ((((-0.563 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^2) + O[x3 - 59.73]^2) + O[x2 - 191.01]^2) + O[x1 - 2709.32]^2}
{2 * Covariance[v][[2, 3]], 2 * Covariance[v][[2, 4]], 2 * Covariance[v][[2, 5]]}
{1187.08, 5.9186, -135.109}

```

```

secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza = {D[G, x2], D[G, x2], D[G, x2]} *
  {D[G, x3], D[G, x4], D[G, x5]} * {2 * Covariance[v][[2, 3]], 2 * Covariance[v][[2, 4]], 2 * Covariance[v][[2, 5]]}
{{{(-3.53383 + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^1} + O[x1 - 2709.32]^2,
  {(0.309987 + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^2} + O[x2 - 191.01]^1 + O[x1 - 2709.32]^2,
  {((-0.707637 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^2) + O[x3 - 59.73]^2} + O[x2 - 191.01]^1 + O[x1 - 2709.32]^2}}

S22 = secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[1]] +
  secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[2]] +
  secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[3]]
{{{(-3.93148 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1} + O[x3 - 59.73]^1 + O[x2 - 191.01]^1} + O[x1 - 2709.32]^2}

{D[G, x3], D[G, x3]}
{{{(0.32 + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^2} + O[x1 - 2709.32]^2, {(0.32 + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^2} + O[x1 - 2709.32]^2}}

{D[G, x4], D[G, x5]}
{{{(-5.63 + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^2} + O[x2 - 191.01]^2} + O[x1 - 2709.32]^2,
  {((-0.563 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^2) + O[x3 - 59.73]^2} + O[x2 - 191.01]^2} + O[x1 - 2709.32]^2}}

{2 * Covariance[v][[3, 4]], 2 * Covariance[v][[3, 5]]}
{1.5422, 4.86456}

terzacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza =
  {D[G, x3], D[G, x3]} * {D[G, x4], D[G, x5]} * {2 * Covariance[v][[3, 4]], 2 * Covariance[v][[3, 5]]}
{{{(-2.77842 + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^1 + O[x2 - 191.01]^2} + O[x1 - 2709.32]^2,
  {((-0.8764 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^2) + O[x3 - 59.73]^1 + O[x2 - 191.01]^2} + O[x1 - 2709.32]^2}}

S23 = terzacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[1]] +
  terzacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[2]]
{{{(-3.65482 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1} + O[x3 - 59.73]^1 + O[x2 - 191.01]^2} + O[x1 - 2709.32]^2}

```

8 | Lmag500.nb

```

2 * Covariance[v][[4, 5]]
0.262136

```

```

S24 = D[G, x4] * D[G, x4] * 2 * Covariance[v][[4, 5]]
{{{(8.3089 + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^2} + O[x2 - 191.01]^2} + O[x1 - 2709.32]^2}

incertezzagrandezzacorrelata = -1 * (s1 + S21 + S22 + S23 + S24)
{{{(9.60636 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1} + O[x3 - 59.73]^1 + O[x2 - 191.01]^1} + O[x1 - 2709.32]^1}}

```

Calcolo della incertezza estesa

```

Import["C:\Documents and Settings\Administrator\Desktop\MATE_STIMA

```

```

  INCERTEZZA ESTESA\L maggiore 500_V85 modello.xls"]

```

```

{{{83.4077}, {77.7777}, {77.7777}, {77.7777}, {77.7777}, {77.7777}, {77.7777}, {77.7777}, {77.7777}, {73.1372}, {81.5822}, {81.5822},
  {81.5822}, {81.5822}, {81.5822}, {81.5822}, {81.5822}, {75.9522}, {73.9154}, {73.9154}, {75.5513}, {81.1813}, {82.8703},
  {82.8703}, {77.2403}, {81.1813}, {81.1813}, {80.6183}, {80.6183}, {80.6183}, {80.6183}, {80.6183}, {80.6183}, {71.4863}, {81.6203},
  {81.6203}, {88.9892}, {90.6782}, {90.6782}, {85.0482}, {88.9892}, {88.9892}, {88.4262}, {88.4262}, {88.4262}, {88.4262},
  {88.4262}, {88.4262}, {88.4262}, {71.3188}, {73.5708}, {67.9408}, {67.9408}, {73.5708}, {74.1338}, {74.1338}, {74.1338},
  {74.1338}, {74.6968}, {74.6968}, {74.6968}, {74.6968}, {68.8415}, {68.8415}, {67.1525}, {67.1525}, {61.5225}, {61.4555},
  {61.4555}, {65.9595}, {65.9595}, {65.9595}, {65.917}, {77.0762}, {79.3282}, {73.6982}, {73.6982}, {73.6982}, {79.3282}, {79.8912},
  {79.8912}, {79.8912}, {79.8912}, {80.4542}, {80.4542}, {80.4542}, {80.4542}, {66.4336}, {66.4336}, {64.7446},
  {64.7446}, {59.1146}, {69.41}, {70.933}, {70.933}, {70.933}, {85.4195}, {85.4195}, {85.4195}, {85.4195}, {85.4195}, {72.0039}}}}

```



```
w = {{83.4077032690634}, {77.77770326906341}, {77.77770326906341}, {77.77770326906341}, {77.77770326906341},
{77.77770326906341}, {77.77770326906341}, {77.77770326906341}, {77.77770326906341}, {77.77770326906341},
{73.13715985191972}, {81.58215985191973}, {81.58215985191973}, {81.58215985191973}, {81.58215985191973}, {81.58215985191973},
{81.58215985191973}, {81.58215985191973}, {81.58215985191973}, {81.58215985191973}, {75.95215985191973},
{73.91543999999999}, {73.91543999999999}, {75.55132435422045}, {81.18132435422045}, {82.87032435422044},
{82.87032435422044}, {77.24032435422045}, {81.18132435422045}, {81.18132435422045}, {81.18132435422045}, {80.61832435422045},
{80.61832435422045}, {80.61832435422045}, {80.61832435422045}, {80.61832435422045}, {80.61832435422045},
{71.48630000000001}, {81.62030000000001}, {81.62030000000001}, {88.98920000000001}, {90.6782}, {90.6782},
{85.04820000000001}, {88.98920000000001}, {88.98920000000001}, {88.42620000000001}, {88.42620000000001},
{88.42620000000001}, {88.42620000000001}, {88.42620000000001}, {88.42620000000001}, {88.42620000000001},
{71.31878}, {73.57078000000001}, {67.94078000000002}, {67.94078000000002}, {73.57078000000001},
{74.13378000000002}, {74.13378000000002}, {74.13378000000002}, {74.13378000000002}, {74.69678},
{74.69678}, {74.69678}, {68.84145326906338}, {68.84145326906338}, {67.15245326906339},
{67.15245326906339}, {61.52245326906339}, {61.455500000000015}, {61.455500000000015},
{65.95950000000002}, {65.95950000000002}, {65.95950000000002}, {65.9170126365429}, {77.07620326906338},
{79.3282032690634}, {73.6982032690634}, {73.6982032690634}, {73.6982032690634}, {79.3282032690634},
{79.8912032690634}, {79.8912032690634}, {79.8912032690634}, {79.8912032690634}, {79.8912032690634},
{80.45420326906338}, {80.45420326906338}, {80.45420326906338}, {80.45420326906338}, {80.45420326906338},
{66.43360000000001}, {64.74460000000002}, {64.74460000000002}, {59.114600000000024},
{69.41004290863293}, {70.9330493983498}, {70.9330493983498}, {70.9330493983498}, {85.41950000000001},
{85.41950000000001}, {85.41950000000001}, {85.41950000000001}, {85.41950000000001}, {72.00388672734246}}
```

10 | Lmag500.nb

```
{{83.4077}, {77.7777}, {77.7777}, {77.7777}, {77.7777}, {77.7777}, {77.7777}, {77.7777}, {77.7777}, {73.1372}, {81.5822}, {81.5822},
{81.5822}, {81.5822}, {81.5822}, {81.5822}, {75.9522}, {73.9154}, {73.9154}, {75.5513}, {81.1813}, {82.8703},
{82.8703}, {77.2403}, {81.1813}, {81.1813}, {80.6183}, {80.6183}, {80.6183}, {80.6183}, {80.6183}, {80.6183}, {71.4863}, {81.6203},
{81.6203}, {88.9892}, {90.6782}, {90.6782}, {85.0482}, {88.9892}, {88.9892}, {88.4262}, {88.4262}, {88.4262}, {88.4262},
{88.4262}, {88.4262}, {88.4262}, {71.3188}, {73.5708}, {67.9408}, {73.5708}, {74.1338}, {74.1338}, {74.1338},
{74.1338}, {74.6968}, {74.6968}, {74.6968}, {74.6968}, {68.8415}, {68.8415}, {67.1525}, {67.1525}, {61.5225}, {61.4555},
{61.4555}, {65.9595}, {65.9595}, {65.9595}, {65.917}, {77.0762}, {79.3282}, {73.6982}, {73.6982}, {73.6982}, {79.3282}, {79.8912},
{79.8912}, {79.8912}, {79.8912}, {80.4542}, {80.4542}, {80.4542}, {80.4542}, {66.4336}, {66.4336}, {64.7446},
{64.7446}, {59.1146}, {69.41}, {70.933}, {70.933}, {70.933}, {85.4195}, {85.4195}, {85.4195}, {85.4195}, {85.4195}, {72.0039}}
```

Mean[w]

```
{77.2965}
```

k1 = 1

1

uy = Sqrt[incertezzagrandezzacorrelata]

```
{{(((3.09941 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^1}}
```

Mean[w] + k1 * uy

```
{{(((80.3959 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^1}}
```

Mean[w] - k1 * uy

```
{{(((74.1971 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^1}}
```

Import["C:\Documents and Settings\Administrator\Desktop\MATE_STIMA
INCERTEZZA ESTESA\L maggiore 500_V85 reale.xls"]

```
{{{81.}, {88.85}, {85.}, {84.55}, {74.}, {70.7}, {70.85}, {69.6}, {73.}, {67.5}, {86.95}, {80.}, {77.7}, {77.9}, {88.}, {84.65}, {84.},  
{88.8}, {76.95}, {73.75}, {76.}, {71.45}, {76.}, {78.1}, {83.}, {84.}, {78.}, {82.}, {89.}, {79.}, {83.}, {78.}, {79.85}, {83.},  
{75.}, {88.}, {80.4}, {87.}, {92.}, {86.}, {86.8}, {95.}, {91.}, {91.55}, {91.}, {94.}, {89.7}, {91.}, {79.4}, {92.1}, {67.},  
{80.}, {69.}, {77.}, {79.}, {73.}, {77.}, {77.}, {76.45}, {73.}, {69.55}, {69.}, {68.}, {63.}, {66.}, {60.}, {68.35}, {62.}, {54.},  
{61.}, {71.65}, {72.}, {72.}, {60.3}, {78.}, {75.}, {79.75}, {80.7}, {82.}, {85.9}, {79.5}, {85.}, {77.8}, {79.}, {70.85}, {73.},  
{76.}, {72.}, {74.8}, {65.}, {63.}, {63.}, {64.}, {59.}, {60.}, {81.}, {79.}, {80.8}, {94.15}, {83.}, {83.9}, {81.}, {83.}, {71.6}}}
```

```
T = Transpose[{{81.}, {88.85}, {85.}, {84.55}, {74.}, {70.7}, {70.85}, {69.6}, {73.}, {67.5}, {86.95}, {80.}, {77.7}, {77.9},  
{88.}, {84.65}, {84.}, {88.8}, {76.95}, {73.75}, {76.}, {71.45}, {76.}, {78.1}, {83.}, {84.}, {78.}, {82.}, {89.},  
{79.}, {83.}, {78.}, {79.85}, {83.}, {75.}, {88.}, {80.4}, {87.}, {92.}, {86.}, {86.8}, {95.}, {91.}, {91.55},  
{91.}, {94.}, {89.7}, {91.}, {79.4}, {92.1}, {67.}, {80.}, {69.}, {77.}, {79.}, {73.}, {77.}, {77.}, {76.45},  
{73.}, {69.55}, {69.}, {68.}, {63.}, {66.}, {60.}, {68.35}, {62.}, {54.}, {61.}, {71.65}, {72.}, {72.}, {60.3},  
{78.}, {75.}, {79.75}, {80.7}, {82.}, {85.9}, {79.5}, {85.}, {77.8}, {79.}, {70.85}, {73.}, {76.}, {72.}, {74.8},  
{65.}, {63.}, {63.}, {64.}, {59.}, {60.}, {81.}, {79.}, {80.8}, {94.15}, {83.}, {83.9}, {81.}, {83.}, {71.6}}}
```

```
{81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8,  
76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1, 83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4, 87., 92.,  
86., 86.8, 95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67., 80., 69., 77., 79., 73., 77., 77., 76.45, 73., 69.55,  
69., 68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 54., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78., 75., 79.75, 80.7, 82., 85.9, 79.5, 85.,  
77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59., 60., 81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}}
```

12 | Lmag500.nb

```
P = {81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8, 76.95,  
73.75, 76., 71.45, 76., 78.1, 83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4, 87., 92., 86., 86.8,  
95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67., 80., 69., 77., 79., 73., 77., 77., 76.45, 73., 69.55, 69.,  
68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 54., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78., 75., 79.75, 80.7, 82., 85.9, 79.5, 85., 77.8,  
79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59., 60., 81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}
```

```
{81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8, 76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1,  
83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4, 87., 92., 86., 86.8, 95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67.,  
80., 69., 77., 79., 73., 77., 77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 54., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78., 75., 79.75, 80.7,  
82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59., 60., 81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}
```

Length[P]

104

```
S1 = Select[{{81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8,  
76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1, 83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4,  
87., 92., 86., 86.8, 95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67., 80., 69., 77., 79., 73., 77.,  
77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 54., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78., 75.,  
79.75, 80.7, 82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59., 60.,  
81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}, 80.39593344800655 > # > 74.19710636727173 &]
```

```
{80., 77.7, 77.9, 76.95, 76., 76., 78.1, 78., 79., 78., 79.85, 75.,
```

```
79.4, 80., 77., 79., 77., 77., 76.45, 78., 75., 79.75, 79.5, 77.8, 79., 76., 74.8, 79.}
```

Length[S1]

28

Percentualepuntiinfascia1 = Length[S1] * 100; Percentualepuntiinfascia1 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia1

350

13

k2 = 2

2

Mean[w] + k2 * uy

$\{(((((83.4953 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^1\}$

Mean[w] - k2 * uy

$\{(((((71.0977 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^1\}$

S2 = Select[[81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8, 76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1, 83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4, 87., 92., 86., 86.8, 95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67., 80., 69., 77., 79., 73., 77., 77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 54., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78., 75., 79.75, 80.7, 82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59., 60., 81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6], 83.49534698837395 > # > 71.09769282690432 &]

{81., 74., 73., 80., 77.7, 77.9, 76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1, 83., 78., 82., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 80.4, 79.4, 80., 77., 79., 73., 77., 77., 76.45, 73., 71.65, 72., 72., 78., 75., 79.75, 80.7, 82., 79.5, 77.8, 79., 73., 76., 72., 74.8, 81., 79., 80.8, 83., 81., 83., 71.6}

Length[S2]

53

Percentualepuntiinfascia2 = Length[S2] * 100; Percentualepuntiinfascia2 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia2

$\frac{1325}{26}$

k3 = 3

3

Mean[w] + k3 * uy

$\{(((((86.5948 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^1\}$

14 | Lmag500.nb

Mean[w] - k3 * uy

$\{(((((67.9983 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^1\}$

S3 = Select[[81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8, 76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1, 83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4, 87., 92., 86., 86.8, 95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67., 80., 69., 77., 79., 73., 77., 77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 54., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78., 75., 79.75, 80.7, 82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59., 60., 81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6], 86.59476052874136 > # > 67.99827928653691 &]

{81., 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 80., 77.7, 77.9, 84.65, 84., 76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1, 83., 84., 78., 82., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 80.4, 86., 79.4, 80., 69., 77., 79., 73., 77., 77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 68.35, 71.65, 72., 72., 78., 75., 79.75, 80.7, 82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 81., 79., 80.8, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}

Length[S3]

71

Percentualepuntiinfascia3 = Length[S3] * 100; Percentualepuntiinfascia3 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia3

$\frac{1775}{26}$

k4 = 4

4

Mean[w] + k4 * uy

$\{(((((89.6942 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^1\}$

Mean[w] - k4 * uy

$\{(((((64.8989 + O[x5 - 9.13]^1) + O[x4 - 0.19]^1) + O[x3 - 59.73]^1) + O[x2 - 191.01]^1) + O[x1 - 2709.32]^1\}$

```
S4 = Select[{81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8,
76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1, 83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4,
87., 92., 86., 86.8, 95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67., 80., 69., 77., 79., 73., 77.,
77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 54., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78., 75.,
79.75, 80.7, 82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59., 60.,
81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}, 89.69417406910878 > # > 64.89886574616949 &]
{81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8,
76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1, 83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4, 87., 86., 86.8,
79.4, 67., 80., 69., 77., 79., 73., 77., 77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 66., 68.35, 71.65, 72., 72., 78., 75., 79.75,
80.7, 82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 81., 79., 80.8, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}
```

Length[S4]

83

Percentualepuntiinfascia4 = Length[S4] * 100; Percentualepuntiinfascia4 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia4

2075

26

k5 = 5

5

Mean[w] + k5 * uy

{((((92.7936 + O[x5 - 9.13]¹) + O[x4 - 0.19]¹) + O[x3 - 59.73]¹) + O[x2 - 191.01]¹) + O[x1 - 2709.32]¹}

Mean[w] - k5 * uy

{((((61.7995 + O[x5 - 9.13]¹) + O[x4 - 0.19]¹) + O[x3 - 59.73]¹) + O[x2 - 191.01]¹) + O[x1 - 2709.32]¹}

16 | Lmag500.nb

```
S5 = Select[{81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8,
76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1, 83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4,
87., 92., 86., 86.8, 95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67., 80., 69., 77., 79., 73., 77.,
77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 54., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78., 75.,
79.75, 80.7, 82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59., 60.,
81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}, 92.79358760947619 > # > 61.79945220580209 &]
{81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8, 76.95, 73.75, 76., 71.45,
76., 78.1, 83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4, 87., 92., 86., 86.8, 91., 91.55, 91., 89.7, 91., 79.4,
92.1, 67., 80., 69., 77., 79., 73., 77., 77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 63., 66., 68.35, 62., 71.65, 72., 72., 78., 75., 79.75,
80.7, 82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 81., 79., 80.8, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}
```

Length[S5]

95

Percentualepuntiinfascia5 = Length[S5] * 100; Percentualepuntiinfascia5 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia5

2375

26

k6 = 6

6

Mean[w] + k6 * uy

{((((95.893 + O[x5 - 9.13]¹) + O[x4 - 0.19]¹) + O[x3 - 59.73]¹) + O[x2 - 191.01]¹) + O[x1 - 2709.32]¹}

Mean[w] - k6 * uy

{((((58.7 + O[x5 - 9.13]¹) + O[x4 - 0.19]¹) + O[x3 - 59.73]¹) + O[x2 - 191.01]¹) + O[x1 - 2709.32]¹}


```
S6 = Select[{81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8,
76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1, 83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4,
87., 92., 86., 86.8, 95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67., 80., 69., 77., 79., 73., 77.,
77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 54., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78., 75.,
79.75, 80.7, 82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59., 60.,
81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}, 95.8930011498436 > # > 58.700038665434676 &]
{81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8, 76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1,
83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4, 87., 92., 86., 86.8, 95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67.,
80., 69., 77., 79., 73., 77., 77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78., 75., 79.75, 80.7,
82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59., 60., 81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}
```

Length[S6]

103

Percentualepuntiinfascia6 = Length[S6] * 100; Percentualepuntiinfascia6 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia6

2575

26

k7 = 7

7

Mean[w] + k7 * uy

{((((98.9924 + O[x5 - 9.13]¹) + O[x4 - 0.19]¹) + O[x3 - 59.73]¹) + O[x2 - 191.01]¹) + O[x1 - 2709.32]¹}

Mean[w] - k7 * uy

{((((55.6006 + O[x5 - 9.13]¹) + O[x4 - 0.19]¹) + O[x3 - 59.73]¹) + O[x2 - 191.01]¹) + O[x1 - 2709.32]¹}

18 | Lmag500.nb

```
S7 = Select[{81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84.,
88.8, 76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1, 83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88.,
80.4, 87., 92., 86., 86.8, 95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67., 80., 69., 77., 79., 73.,
77., 77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 54., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78.,
75., 79.75, 80.7, 82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59.,
60., 81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}, 98.992414690211 > # > 55.60062512506727 &]
{81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8, 76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1,
83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4, 87., 92., 86., 86.8, 95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67.,
80., 69., 77., 79., 73., 77., 77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78., 75., 79.75, 80.7,
82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59., 60., 81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}
```

Length[S7]

103

k8 = 8

8

Mean[w] + k8 * uy

{((((102.092 + O[x5 - 9.13]¹) + O[x4 - 0.19]¹) + O[x3 - 59.73]¹) + O[x2 - 191.01]¹) + O[x1 - 2709.32]¹}

Mean[w] - k8 * uy

{((((52.5012 + O[x5 - 9.13]¹) + O[x4 - 0.19]¹) + O[x3 - 59.73]¹) + O[x2 - 191.01]¹) + O[x1 - 2709.32]¹}

```

S8 = Select[{81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8,
76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1, 83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4,
87., 92., 86., 86.8, 95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67., 80., 69., 77., 79., 73., 77.,
77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 54., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78., 75.,
79.75, 80.7, 82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59., 60.,
81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}, 102.09182823057841 > # > 52.50121158469986 &]
{81., 88.85, 85., 84.55, 74., 70.7, 70.85, 69.6, 73., 67.5, 86.95, 80., 77.7, 77.9, 88., 84.65, 84., 88.8, 76.95, 73.75, 76., 71.45, 76., 78.1,
83., 84., 78., 82., 89., 79., 83., 78., 79.85, 83., 75., 88., 80.4, 87., 92., 86., 86.8, 95., 91., 91.55, 91., 94., 89.7, 91., 79.4, 92.1, 67.,
80., 69., 77., 79., 73., 77., 77., 76.45, 73., 69.55, 69., 68., 63., 66., 60., 68.35, 62., 54., 61., 71.65, 72., 72., 60.3, 78., 75., 79.75, 80.7,
82., 85.9, 79.5, 85., 77.8, 79., 70.85, 73., 76., 72., 74.8, 65., 63., 63., 64., 59., 60., 81., 79., 80.8, 94.15, 83., 83.9, 81., 83., 71.6}

```

Length[S8]

104

Percentualepuntiinfascia8 = Length[S8] * 100; Percentualepuntiinfascia8 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia8

100

Linearizzazione del Modello predittivo della Veocità Operativa in Rettifilo per Lunghezze minori di 500m

```
F = Series[49 + 3.1 * 10^-4 * x1^2 - 0.14 * x1 + 0.02 * x2 - 6.64 * x3 + 0.493 * x4,
{x1, 169.12, 1}, {x2, 257.55, 1}, {x3, 0.29, 1}, {x4, 52.9, 1}]
(( (63.4948 + 0.493 (x4 - 52.9) + O[x4 - 52.9]^2) - 6.64 (x3 - 0.29) + O[x3 - 0.29]^2) +
0.02 (x2 - 257.55) + O[x2 - 257.55]^2) - 0.0351456 (x1 - 169.12) + O[x1 - 169.12]^2
```

*-Si riportano in forma vettoriale le derivate parziali, ed il rispettivo quadrato, della funzione linearizzata nel suo sviluppo
in serie di Taylor, nell'intorno del punto medio di ciascuna variabile indipendente considerata, arrestato ai termini del primo ordine -*

```
dx1 = FullSimplify[D[F, x1]] ;; {D[F, x1]^2}
{-0.0351456 + O[x1 - 169.12]^1} ;; {0.00123521 + O[x1 - 169.12]^1}
dx2 = FullSimplify[D[F, x2]] ;; {D[F, x2]^2}
{(0.02 + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^2} ;; {(0.0004 + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^2}
dx3 = FullSimplify[D[F, x3]] ;; {D[F, x3]^2}
{((-6.64 + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^2) + O[x1 - 169.12]^2}
;; {(44.0896 + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^2 + O[x1 - 169.12]^2}
dx4 = FullSimplify[D[F, x4]] ;; {D[F, x4]^2}
{((0.493 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^2) + O[x2 - 257.55]^2 + O[x1 - 169.12]^2} ;;
{((0.243049 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^2) + O[x2 - 257.55]^2 + O[x1 - 169.12]^2}
```

2 | Lmin500.nb

Costruzione della Matrice di Covarianza

```
Import["C:\\Documents and
Settings\\Administrator\\Desktop\\matematica file\\mate rett minore 500.xls"]
{{{280., 136., 1., 59.05}, {200., 131.5, 1., 90.3}, {300., 139.5, 1., 57.35},
{300., 251., 1., 57.35}, {300., 310., 1., 57.35}, {55., 108., 0., 35.},
{55., 508., 0., 35.}, {25., 171.5, 0., 31.}, {25., 330., 0., 31.}, {25., 479., 0., 31.},
{100., 248.5, 1., 47.}, {100., 189.5, 1., 47.}, {25., 501.5, 0., 34.},
{25., 336.5, 0., 34.}, {25., 171.5, 0., 34.}, {30., 514., 0., 34.}, {30., 355.5, 0., 34.},
{30., 206.5, 0., 34.}, {30., 126.5, 0., 34.}, {100., 282., 0., 64.},
{110., 151., 0., 52.}, {110., 228., 0., 52.}, {110., 306., 0., 52.}, {110., 385., 1., 52.},
{300., 370., 0., 66.95}, {300., 259., 0., 66.95}, {300., 198.5, 0., 66.95},
{300., 157., 0., 66.95}, {110., 170., 0., 53.}, {400., 108., 0., 75.}, {400., 146., 0., 75.},
{450., 361.166, 1., 82.8}, {450., 223.166, 1., 82.8}, {240., 197.274, 0., 74.}}}
```

Lmin500.nb | 3

```

v = {{280., 136., 1., 59.05}, {200., 131.5, 1., 90.3}, {300., 139.5, 1., 57.35},
{300., 251., 1., 57.35}, {300., 310., 1., 57.35}, {55., 108., 0., 35.},
{55., 508., 0., 35.}, {25., 171.5, 0., 31.}, {25., 330., 0., 31.},
{25., 479., 0., 31.}, {100., 248.5, 1., 47.}, {100., 189.5, 1., 47.},
{25., 501.5, 0., 34.}, {25., 336.5, 0., 34.}, {25., 171.5, 0., 34.},
{30., 514., 0., 34.}, {30., 355.5, 0., 34.}, {30., 206.5, 0., 34.},
{30., 126.5, 0., 34.}, {100., 282., 0., 64.}, {110., 151., 0., 52.},
{110., 228., 0., 52.}, {110., 306., 0., 52.}, {110., 385., 1., 52.},
{300., 370., 0., 66.95}, {300., 259., 0., 66.95}, {300., 198.5, 0., 66.95},
{300., 157., 0., 66.95}, {110., 170., 0., 53.}, {400., 108., 0., 75.},
{400., 146., 0., 75.}, {450., 361.16600000000005, 1., 82.8},
{450., 223.16600000000008, 1., 82.8}, {240., 197.27400000000001, 0., 74.}}

{{280., 136., 1., 59.05}, {200., 131.5, 1., 90.3}, {300., 139.5, 1., 57.35},
{300., 251., 1., 57.35}, {300., 310., 1., 57.35}, {55., 108., 0., 35.},
{55., 508., 0., 35.}, {25., 171.5, 0., 31.}, {25., 330., 0., 31.}, {25., 479., 0., 31.},
{100., 248.5, 1., 47.}, {100., 189.5, 1., 47.}, {25., 501.5, 0., 34.},
{25., 336.5, 0., 34.}, {25., 171.5, 0., 34.}, {30., 514., 0., 34.}, {30., 355.5, 0., 34.},
{30., 206.5, 0., 34.}, {30., 126.5, 0., 34.}, {100., 282., 0., 64.},
{110., 151., 0., 52.}, {110., 228., 0., 52.}, {110., 306., 0., 52.}, {110., 385., 1., 52.},
{300., 370., 0., 66.95}, {300., 259., 0., 66.95}, {300., 198.5, 0., 66.95},
{300., 157., 0., 66.95}, {110., 170., 0., 53.}, {400., 108., 0., 75.}, {400., 146., 0., 75.},
{450., 361.166, 1., 82.8}, {450., 223.166, 1., 82.8}, {240., 197.274, 0., 74.}}

MatrixForm[Covariance[v]]

$$\begin{pmatrix} 20.075 & -5182.32 & 27.2371 & 2179.85 \\ -5182.32 & 14632.3 & -6.06486 & -751.706 \\ 27.2371 & -6.06486 & 0.213904 & 3.14973 \\ 2179.85 & -751.706 & 3.14973 & 311.268 \end{pmatrix}$$


```

4 | Lmin500.nb

Calcolo dell'incertezza composta per grandezze correlate

```

Import["C:\\Documents and
Settings\\Administrator\\Desktop\\matematica file\\ux L minore 500.xls"]
{{{590.44, 430.36, 0.00629129, 9.15495}}}}
s = {590.4398657858865, 430.360346103493, 0.006291286568103176, 9.154945475516376}
{590.44, 430.36, 0.00629129, 9.15495}
u = {{s[[1]]}, {s[[2]]}, {s[[3]]}, {s[[4]]}}
{{590.44}, {430.36}, {0.00629129}, {9.15495}}
f = {D[F, x1]^2, D[F, x2]^2, D[F, x3]^2, D[F, x4]^2}
{0.00123521 + O[x1 - 169.12]^1, (0.0004 + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^2,
((44.0896 + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^2) + O[x1 - 169.12]^2,
(((0.243049 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^2) + O[x2 - 257.55]^2) + O[x1 - 169.12]^2}
s1 = primacomponenteprimomembroequazionegeneraleincertezza = f.u
{((3.40394 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^1 + O[x1 - 169.12]^1}
{D[F, x1], D[F, x1], D[F, x1]}
{-0.0351456 + O[x1 - 169.12]^1, -0.0351456 + O[x1 - 169.12]^1, -0.0351456 + O[x1 - 169.12]^1}
{D[F, x2], D[F, x3], D[F, x4]}
{0.02 + O[x2 - 257.55]^1 + O[x1 - 169.12]^2,
((-6.64 + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^2) + O[x1 - 169.12]^2,
(((0.493 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^2) + O[x2 - 257.55]^2) + O[x1 - 169.12]^2}
{2 * Covariance[v][[1, 2]], 2 * Covariance[v][[1, 3]], 2 * Covariance[v][[1, 4]]}
{-10364.6, 54.4742, 4359.71}

```



```

primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza =
  {D[F, x1], D[F, x1], D[F, x1]} * {D[F, x2], D[F, x3], D[F, x4]} *
  {2 * Covariance[v][[1, 2]], 2 * Covariance[v][[1, 3]], 2 * Covariance[v][[1, 4]]}
{ (7.28542 + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^1,
  ((12.7125 + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^2) + O[x1 - 169.12]^1,
  (((-75.5397 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^2) + O[x2 - 257.55]^2) + O[x1 - 169.12]^1}

S21 = primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[1]] +
  primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[2]] +
  primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[3]]
{((-55.5418 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^1
D[F, x2], D[F, x2]}
{ (0.02 + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^2, (0.02 + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^2}
D[F, x3], D[F, x4]}
{((-6.64 + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^2) + O[x1 - 169.12]^2,
  (((0.493 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^2) + O[x2 - 257.55]^2) + O[x1 - 169.12]^2}
{2 * Covariance[v][[2, 3]], 2 * Covariance[v][[2, 4]]}
{-12.1297, -1503.41}

secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza =
  {D[F, x2], D[F, x2]} * {D[F, x3], D[F, x4]} * {2 * Covariance[v][[2, 3]], 2 * Covariance[v][[2, 4]]}
{((1.61083 + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^2,
  (((-14.8236 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^2) + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^2}

```

6 | Lmin500.nb

```

S22 = secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[1]] +
  secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[2]]
{((-13.2128 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^2
2 * Covariance[v][[3, 4]]
6.29947

S23 = D[F, x3] * D[F, x4] * 2 * Covariance[v][[3, 4]]
{((-20.6214 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^2) + O[x1 - 169.12]^2

incertezzagrandezzacorrelata = -1 * (s1 + S21 + S22 + S23)
{(((85.9721 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^1}

Calcolo della incertezza estesa

Import["C:\\Documents and Settings\\Administrator\\Desktop\\MATE_STIMA
INCERTEZZA ESTESA\\L minore 500_v85 modello.xls"]
{{{58.1324}, {73.0587}, {58.0808}, {60.2606}, {61.414}, {61.3797},
{69.1996}, {64.2221}, {67.3208}, {70.2337}, {59.0892}, {57.9357}, {72.1526},
{68.9268}, {65.7011}, {71.7627}, {68.664}, {65.7511}, {64.1871}, {74.7651},
{65.5001}, {67.0054}, {68.5303}, {63.4347}, {73.9598}, {71.7898}, {70.607},
{69.7957}, {66.3645}, {80.1164}, {80.8593}, {88.2512}, {85.5533}, {72.6487}}}

```

```
w = [{"58.13244999999999"}], [{"73.05872"}], [{"58.08077499999999"}], [{"60.2606"}], [{"61.41404999999999"}], [{"61.37965"}], [{"69.19964999999999"}], [{"64.222075"}], [{"67.32075"}], [{"70.23370000000001"}], [{"59.089175000000004"}], [{"57.935725000000005"}], [{"72.15257500000001"}], [{"68.92682500000001"}], [{"65.701075"}], [{"71.76270000000001"}], [{"68.66402500000001"}], [{"65.75107500000001"}], [{"64.18707500000001"}], [{"74.7651"}], [{"65.50005"}], [{"67.0054"}], [{"68.5303"}], [{"63.434749999999994"}], [{"73.95984999999999"}], [{"71.7898"}], [{"70.607025"}], [{"69.7957"}], [{"66.3645"}], [{"80.1164"}], [{"80.8593"}], [{"88.2511953"}], [{"85.5532953"}], [{"72.6487067"}]]

[{"58.1324"}, {"73.0587"}, {"58.0808"}, {"60.2606"}, {"61.414"}, {"61.3797"}, {"69.1996"}, {"64.2221"}, {"67.3208"}, {"70.2337"}, {"59.0892"}, {"57.9357"}, {"72.1526"}, {"68.9268"}, {"65.7011"}, {"71.7627"}, {"68.664"}, {"65.7511"}, {"64.1871"}, {"74.7651"}, {"65.5001"}, {"67.0054"}, {"68.5303"}, {"63.4347"}, {"73.9598"}, {"71.7898"}, {"70.607"}, {"69.7957"}, {"66.3645"}, {"80.1164"}, {"80.8593"}, {"88.2512"}, {"85.5533"}, {"72.6487}]

Mean[w]

{68.7251}

k1 = 1

1

uy = Sqrt[incertezzagrandezzacorrelata]

{((9.27211 + 0[x4 - 52.9]¹) + 0[x3 - 0.29]¹) + 0[x2 - 257.55]¹) + 0[x1 - 169.12]¹}

Import["C:\\Documents and Settings\\Administrator\\Desktop\\MATE_STIMA
INCERTEZZA ESTESA\\L minore 500_V85 reale.xls"]

{{{"57."}, {"68."}, {"54."}, {"56.55"}, {"62."}, {"62."}, {"69."}, {"66."}, {"73."}, {"68.25"}, {"64."}, {"61."}, {"75.4"}, {"69.2"}, {"62."}, {"72.45"}, {"65."}, {"65."}, {"57."}, {"72."}, {"70.9"}, {"66."}, {"63."}, {"63."}, {"68.2"}, {"72.45"}, {"73."}, {"72."}, {"71."}, {"75.8"}, {"80."}, {"86."}, {"90.85"}, {"80.}}}}
```

```

8 | Lmin500.nb
T = Transpose[{{57.}, {68.}, {54.}, {56.55}, {62.}, {62.}, {69.},
{66.}, {73.}, {68.25}, {64.}, {61.}, {75.4}, {69.2}, {62.}, {72.45},
{65.}, {65.}, {57.}, {72.}, {70.9}, {66.}, {63.}, {63.}, {68.2},
{72.45}, {73.}, {72.}, {71.}, {75.8}, {80.}, {86.}, {90.85}, {80.}}]
{{57., 68., 54., 56.55, 62., 62., 69., 66., 73., 68.25, 64., 61., 75.4, 69.2, 62., 72.45, 65., 65.,
57., 72., 70.9, 66., 63., 63., 68.2, 72.45, 73., 72., 71., 75.8, 80., 86., 90.85, 80.}}

P = {77., 68., 54., 56.55, 62., 62., 69., 66., 73., 68.25,
64., 61., 75.4, 69.2, 62., 72.45, 65., 65., 57., 72., 70.9, 66.,
63., 63., 68.2, 72.45, 73., 72., 71., 75.8, 80., 86., 90.85, 80.}

{57., 68., 54., 56.55, 62., 62., 69., 66., 73., 68.25, 64., 61., 75.4, 69.2, 62., 72.45, 65.,
65., 57., 72., 70.9, 66., 63., 63., 68.2, 72.45, 73., 72., 71., 75.8, 80., 86., 90.85, 80.}

Length[P]
34

Mean[w] + k1 * uy
{{{(77.9972 + O[x4 - 52.9])^1} + O[x3 - 0.29]^1} + O[x2 - 257.55]^1} + O[x1 - 169.12]^1}]

Mean[w] - k1 * uy
{{{(59.453 + O[x4 - 52.9])^1} + O[x3 - 0.29]^1} + O[x2 - 257.55]^1} + O[x1 - 169.12]^1}]

S1 = Select[{57., 68., 54., 56.55, 62., 62., 69., 66., 73., 68.25, 64., 61., 75.4,
69.2, 62., 72.45, 65., 65., 57., 72., 70.9, 66., 63., 63., 68.2, 72.45, 73.,
72., 71., 75.8, 80., 86., 90.85, 80.}, 77.99723397830621 > # > 59.45300409816437 &]

{68., 62., 62., 69., 66., 73., 68.25, 64., 61., 75.4, 69.2, 62.,
72.45, 65., 65., 72., 70.9, 66., 63., 63., 68.2, 72.45, 73., 72., 71., 75.8}

Length[S1]
26

```

```

Percentualepuntiinfascia1 = Length[S1] * 100;
Percentualepuntiinfascia1 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia1
1300
17
k2 = 2

2
Mean[w] + k2 * uy
{(( (87.2693 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^1}
Mean[w] - k2 * uy
{(( (50.1809 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^1}
S2 = Select[{57., 68., 54., 56.55, 62., 62., 69., 66., 73., 68.25, 64., 61., 75.4,
69.2, 62., 72.45, 65., 65., 57., 72., 70.9, 66., 63., 63., 68.2, 72.45, 73.,
72., 71., 75.8, 80., 86., 90.85, 80.}, 87.26934891837715` > # > 50.18088915809344` &]
{57., 68., 54., 56.55, 62., 62., 69., 66., 73., 68.25, 64., 61., 75.4, 69.2, 62., 72.45, 65.,
65., 57., 72., 70.9, 66., 63., 63., 68.2, 72.45, 73., 72., 71., 75.8, 80., 86., 80.}
Length[S2]
33
Percentualepuntiinfascia2 = Length[S2] * 100;
Percentualepuntiinfascia2 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia2
1650
17
k3 = 3
3

```

10 | Lmin500.nb

```

Mean[w] + k3 * uy
{(( (96.5415 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^1}
Mean[w] - k3 * uy
{(( (40.9088 + O[x4 - 52.9]^1) + O[x3 - 0.29]^1) + O[x2 - 257.55]^1) + O[x1 - 169.12]^1}
S3 = Select[{57., 68., 54., 56.55, 62., 62., 69., 66., 73., 68.25, 64., 61., 75.4,
69.2, 62., 72.45, 65., 65., 57., 72., 70.9, 66., 63., 63., 68.2, 72.45, 73.,
72., 71., 75.8, 80., 86., 90.85, 80.}, 96.54146385844807` > # > 40.908774218022515` &]
{57., 68., 54., 56.55, 62., 62., 69., 66., 73., 68.25, 64., 61., 75.4, 69.2, 62., 72.45, 65.,
65., 57., 72., 70.9, 66., 63., 63., 68.2, 72.45, 73., 72., 71., 75.8, 80., 86., 90.85, 80.}
Length[S3]
34
Percentualepuntiinfascia3 = Length[S3] * 100;
Percentualepuntiinfascia3 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia3
100

```

```
A = Series[
  54 + 0.29 * x1^2 - 0.026 * x2 + (10^-5) * x2^2 - 0.8 * x3 - 2.68 * x4 + 0.12 * x5 - (4.5 * 10^-4) * x5^2,
  {x1, 6.17, 1}, {x2, 897.50, 1}, {x3, 4.91, 1}, {x4, 0.44, 1}, {x5, 74.42, 1}]
(((51.091 + 0.053022 (x5 - 74.42) + O[x5 - 74.42]^2) - 2.68 (x4 - 0.44) + O[x4 - 0.44]^2) -
0.8 (x3 - 4.91) + O[x3 - 4.91]^2) -
0.0805 (x2 - 897.5) + O[x2 - 897.5]^2) + 3.5786 (x1 - 6.17) + O[x1 - 6.17]^2
```

```

dx1 = FullSimplify[{D[A, x1]} ;; {D[A, x1]^2}]
{3.5786+O[x1-6.17]^1} ;; {12.8064+O[x1-6.17]^1}

dx2 = FullSimplify[{D[A, x2]} ;; {D[A, x2]^2}]
{(-0.00805+O[x2-897.5]^1)+O[x1-6.17]^2} ;; {(0.0000648025+O[x2-897.5]^1)+O[x1-6.17]^2}

dx3 = FullSimplify[{D[A, x3]} ;; {D[A, x3]^2}]
{((-0.8+O[x3-4.91]^1)+O[x2-897.5]^2)+O[x1-6.17]^2}
;; {(0.64+O[x3-4.91]^1)+O[x2-897.5]^2)+O[x1-6.17]^2}

dx4 = FullSimplify[{D[A, x4]} ;; {D[A, x4]^2}]
{((-2.68+O[x4-0.44]^1)+O[x3-4.91]^2)+O[x2-897.5]^2)+O[x1-6.17]^2}
;; {(((7.1824+O[x4-0.44]^1)+O[x3-4.91]^2)+O[x2-897.5]^2)+O[x1-6.17]^2}

```

```
dx5 = FullSimplify[{D[A, x5]] ;; {D[A, x5]^2}}
{ { ( ( (0.0530222 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^2) + O[x3 - 4.91]^2) + O[x2 - 897.5]^2) + O[x1 - 6.17]^2] ;;
  { ( ( (0.00281133 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^2) + O[x3 - 4.91]^2) + O[x2 - 897.5]^2) + O[x1 - 6.17]^2}
```

```
Import["C:\\Documents and Settings\\Administrator\\Desktop\\matematica file\\mate CCR maggiore 240.xls"]
```

```
{{{8.3, 1591.49, 8., 1., 70.}, {7.16, 424.399, 8., 0., 30.}, {6.4, 489.724, 9., 0., 40.},  
{6.3, 846.163, 9., 1., 130.}, {5.9, 318.241, 9., 0., 30.}, {6.2, 212.246, 9., 0., 200.},  
{6.5, 1273.11, 5., 1., 25.}, {5.9, 1818.75, 5., 1., 95.}, {6., 848.837, 5., 0., 35.},  
{5.9, 1414.67, 5., 0., 30.}, {5.8, 1157.5, 5., 0., 45.}, {6.25, 1273.24, 5., 0., 55.},  
{5.8, 1273.23, 3., 1., 50.}, {6.3, 424.409, 3., 1., 50.}, {6.4, 848.817, 3., 1., 35.},  
{6., 636.605, 3., 1., 75.}, {6., 1414.91, 3., 1., 55.}, {5.7, 707.357, 3., 1., 45.},  
{5.65, 471.572, 2., 0., 75.}, {6., 636.556, 2., 0., 178.56}, {5.4, 578.746, 2., 0., 30.},  
{8.3, 1591.49, 8., 1., 30.}, {7.16, 424.399, 8., 0., 40.}, {6.4, 489.724, 9., 0., 75.},  
{6.3, 846.163, 9., 1., 80.}, {5.9, 318.241, 9., 0., 300.}, {6.2, 212.246, 9., 0., 40.},  
{6.5, 1273.11, 5., 1., 95.}, {6., 848.837, 5., 0., 80.}, {5.9, 1414.67, 5., 0., 55.},  
{5.8, 1157.5, 5., 0., 50.}, {6.25, 1273.24, 5., 0., 50.}, {5.8, 1273.23, 3., 1., 150.},  
{6.3, 424.409, 3., 1., 75.}, {6.4, 848.817, 3., 1., 100.}, {6., 636.605, 3., 1., 55.},  
{6., 1414.91, 3., 1., 90.}, {5.7, 707.357, 3., 1., 75.}, {5.65, 471.572, 2., 0., 178.56},  
{6., 636.556, 2., 0., 40.}, {5.8, 1414.72, 2., 0., 38.}, {5.6, 1675.33, 2., 0., 30.},  
{5.4, 578.746, 2., 0., 95.}, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , },  
{ , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , },  
{ , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , },  
{ , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , },  
{ , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }, { , , , }}}
```

```

v = {{8.3`, 1591.4858906525471`, 8.`, 1.`, 70.`,
      {7.16`, 424.3993755329701`, 8.`, 0.`, 30.}, {6.4`, 489.7238658948828`, 9.`, 0.`, 40.},
      {6.3`, 846.1625441696114`, 9.`, 1.`, 130.}, {5.9`, 318.24063876652065`, 9.`, 0.`, 30.},
      {6.2`, 212.24551978151595`, 9.`, 0.`, 200.}, {6.5`, 1273.113286130786`, 5.`, 1.`, 25.},
      {5.9`, 1818.7533988705243`, 5.`, 1.`, 95.}, {6.`, 848.8369546171425`, 5.`, 0.`, 35.},
      {5.9`, 1414.6675520876663`, 5.`, 0.`, 30.}, {5.8`, 1157.4973591391704`, 5.`, 0.`, 45.},
      {6.25`, 1273.2425821546249`, 5.`, 0.`, 55.}, {5.8`, 1273.2324986580045`, 3.`, 1.`, 50.},
      {6.3`, 424.40901594282843`, 3.`, 1.`, 50.}, {6.4`, 848.8169364881732`, 3.`, 1.`, 35.},
      {6.`, 636.6054541077785`, 3.`, 1.`, 75.}, {6.`, 1414.9067543485348`, 3.`, 1.`, 55.},
      {5.7`, 707.3569419467881`, 3.`, 1.`, 45.}, {5.65`, 471.5723546609035`, 2.`, 0.`, 75.},
      {6.`, 636.5564932020363`, 2.`, 0.`, 178.56}, {5.4`, 578.7458641877981`, 2.`, 0.`, 30.},
      {8.3`, 1591.4858906525471`, 8.`, 1.`, 30.}, {7.16`, 424.3993755329701`, 8.`, 0.`, 40.},
      {6.4`, 489.7238658948828`, 9.`, 0.`, 75.}, {6.3`, 846.1625441696114`, 9.`, 1.`, 80.},
      {5.9`, 318.24063876652065`, 9.`, 0.`, 300.}, {6.2`, 212.24551978151595`, 9.`, 0.`, 40.},
      {6.5`, 1273.113286130786`, 5.`, 1.`, 95.}, {6.`, 848.8369546171425`, 5.`, 0.`, 80.},
      {5.9`, 1414.6675520876663`, 5.`, 0.`, 55.}, {5.8`, 1157.4973591391704`, 5.`, 0.`, 50.},
      {6.25`, 1273.2425821546249`, 5.`, 0.`, 50.}, {5.8`, 1273.2324986580045`, 3.`, 1.`, 150.},
      {6.3`, 424.40901594282843`, 3.`, 1.`, 75.}, {6.4`, 848.8169364881732`, 3.`, 1.`, 100.},
      {6.`, 636.6054541077785`, 3.`, 1.`, 55.}, {6.`, 1414.9067543485348`, 3.`, 1.`, 90.},
      {5.7`, 707.3569419467881`, 3.`, 1.`, 75.}, {5.65`, 471.5723546609035`, 2.`, 0.`, 178.56},
      {6.`, 636.5564932020363`, 2.`, 0.`, 40.}, {5.8`, 1414.715674269093`, 2.`, 0.`, 38.},
      {5.6`, 1675.3336160756733`, 2.`, 0.`, 30.}, {5.4`, 578.7458641877981`, 2.`, 0.`, 95.}}

```

4 | CCRMaggiore240.nb

```

{{8.3, 1591.49, 8., 1., 70.}, {7.16, 424.399, 8., 0., 30.},
 {6.4, 489.724, 9., 0., 40.}, {6.3, 846.163, 9., 1., 130.}, {5.9, 318.241, 9., 0., 30.},
 {6.2, 212.246, 9., 0., 200.}, {6.5, 1273.11, 5., 1., 25.}, {5.9, 1818.75, 5., 1., 95.},
 {6., 848.837, 5., 0., 35.}, {5.9, 1414.67, 5., 0., 30.}, {5.8, 1157.5, 5., 0., 45.},
 {6.25, 1273.24, 5., 0., 55.}, {5.8, 1273.23, 3., 1., 50.}, {6.3, 424.409, 3., 1., 50.},
 {6.4, 848.817, 3., 1., 35.}, {6., 636.605, 3., 1., 75.}, {6., 1414.91, 3., 1., 55.},
 {5.7, 707.357, 3., 1., 45.}, {5.65, 471.572, 2., 0., 75.}, {6., 636.556, 2., 0., 178.56},
 {5.4, 578.746, 2., 0., 30.}, {8.3, 1591.49, 8., 1., 30.}, {7.16, 424.399, 8., 0., 40.},
 {6.4, 489.724, 9., 0., 75.}, {6.3, 846.163, 9., 1., 80.}, {5.9, 318.241, 9., 0., 300.},
 {6.2, 212.246, 9., 0., 40.}, {6.5, 1273.11, 5., 1., 95.}, {6., 848.837, 5., 0., 80.},
 {5.9, 1414.67, 5., 0., 55.}, {5.8, 1157.5, 5., 0., 50.}, {6.25, 1273.24, 5., 0., 50.},
 {5.8, 1273.23, 3., 1., 150.}, {6.3, 424.409, 3., 1., 75.}, {6.4, 848.817, 3., 1., 100.},
 {6., 636.605, 3., 1., 55.}, {6., 1414.91, 3., 1., 90.}, {5.7, 707.357, 3., 1., 75.},
 {5.65, 471.572, 2., 0., 178.56}, {6., 636.556, 2., 0., 40.},
 {5.8, 1414.72, 2., 0., 38.}, {5.6, 1675.33, 2., 0., 30.}, {5.4, 578.746, 2., 0., 95.}}

```

MatrixForm[Covariance[v]]

```

( 0.364736 41.678 0.822182 0.078804 -5.2552 )
( 41.678 202390. -238.01 66.63 -6572.71 )
( 0.822182 -238.01 6.75305 -0.196013 16.2458 )
( 0.078804 66.63 -0.196013 0.252492 -0.809679 )
( -5.2552 -6572.71 16.2458 -0.809679 3059.02 )

```


[illegible]

```
6 | C:\Program Files\Microsoft Visual Studio\2019\Community\VC\Tools\MSVC\14.29.30133\bin\Hostx64\x64\cl.exe
[1] 1
[2] 1
[3] 1
[4] 1
[5] 1
[6] 1
[7] 1
[8] 1
[9] 1
[10] 1
[11] 1
[12] 1
[13] 1
[14] 1
[15] 1
[16] 1
[17] 1
[18] 1
[19] 1
[20] 1
[21] 1
[22] 1
[23] 1
[24] 1
[25] 1
[26] 1
[27] 1
[28] 1
[29] 1
[30] 1
[31] 1
[32] 1
[33] 1
[34] 1
[35] 1
[36] 1
[37] 1
[38] 1
[39] 1
[40] 1
[41] 1
[42] 1
[43] 1
[44] 1
[45] 1
[46] 1
[47] 1
[48] 1
[49] 1
[50] 1
[51] 1
[52] 1
[53] 1
[54] 1
[55] 1
[56] 1
[57] 1
[58] 1
[59] 1
[60] 1
[61] 1
[62] 1
[63] 1
[64] 1
[65] 1
[66] 1
[67] 1
[68] 1
[69] 1
[70] 1
[71] 1
[72] 1
[73] 1
[74] 1
[75] 1
[76] 1
[77] 1
[78] 1
[79] 1
[80] 1
[81] 1
[82] 1
[83] 1
[84] 1
[85] 1
[86] 1
[87] 1
[88] 1
[89] 1
[90] 1
[91] 1
[92] 1
[93] 1
[94] 1
[95] 1
[96] 1
[97] 1
[98] 1
[99] 1
[100] 1
[101] 1
[102] 1
[103] 1
[104] 1
[105] 1
[106] 1
[107] 1
[108] 1
[109] 1
[110] 1
[111] 1
[112] 1
[113] 1
[114] 1
[115] 1
[116] 1
[117] 1
[118] 1
[119] 1
[120] 1
[121] 1
[122] 1
[123] 1
[124] 1
[125] 1
[126] 1
[127] 1
[128] 1
[129] 1
[130] 1
[131] 1
[132] 1
[133] 1
[134] 1
[135] 1
[136] 1
[137] 1
[138] 1
[139] 1
[140] 1
[141] 1
[142] 1
[143] 1
[144] 1
[145] 1
[146] 1
[147] 1
[148] 1
[149] 1
[150] 1
[151] 1
[152] 1
[153] 1
[154] 1
[155] 1
[156] 1
[157] 1
[158] 1
[159] 1
[160] 1
[161] 1
[162] 1
[163] 1
[164] 1
[165] 1
[166] 1
[167] 1
[168] 1
[169] 1
[170] 1
[171] 1
[172] 1
[173] 1
[174] 1
[175] 1
[176] 1
[177] 1
[178] 1
[179] 1
[180] 1
[181] 1
[182] 1
[183] 1
[184] 1
[185] 1
[186] 1
[187] 1
[188] 1
[189] 1
[190] 1
[191] 1
[192] 1
[193] 1
[194] 1
[195] 1
[196] 1
[197] 1
[198] 1
[199] 1
[200] 1
[201] 1
[202] 1
[203] 1
[204] 1
[205] 1
[206] 1
[207] 1
[208] 1
[209] 1
[210] 1
[211] 1
[212] 1
[213] 1
[214] 1
[215] 1
[216] 1
[217] 1
[218] 1
[219] 1
[220] 1
[221] 1
[222] 1
[223] 1
[224] 1
[225] 1
[226] 1
[227] 1
[228] 1
[229] 1
[230] 1
[231] 1
[232] 1
[233] 1
[234] 1
[235] 1
[236] 1
[237] 1
[238] 1
[239] 1
[240] 1
[241] 1
[242] 1
[243] 1
[244] 1
[245] 1
[246] 1
[247] 1
[248] 1
[249] 1
[250] 1
[251] 1
[252] 1
[253] 1
[254] 1
[255] 1
[256] 1
[257] 1
[258] 1
[259] 1
[260] 1
[261] 1
[262] 1
[263] 1
[264] 1
[265] 1
[266] 1
[267] 1
[268] 1
[269] 1
[270] 1
[271] 1
[272] 1
[273] 1
[274] 1
[275] 1
[276] 1
[277] 1
[278] 1
[279] 1
[280] 1
[281] 1
[282] 1
[283] 1
[284] 1
[285] 1
[286] 1
[287] 1
[288] 1
[289] 1
[290] 1
[291] 1
[292] 1
[293] 1
[294] 1
[295] 1
[296] 1
[297] 1
[298] 1
[299] 1
[300] 1
[301] 1
[302] 1
[303] 1
[304] 1
[305] 1
[306] 1
[307] 1
[308] 1
[309] 1
[310] 1
[311] 1
[312] 1
[313] 1
[314] 1
[315] 1
[316] 1
[317] 1
[318] 1
[319] 1
[320] 1
[321] 1
[322] 1
[323] 1
[324] 1
[325] 1
[326] 1
[327] 1
[328] 1
[329] 1
[330] 1
[331] 1
[332] 1
[333] 1
[334] 1
[335] 1
[336] 1
[337] 1
[338] 1
[339] 1
[340] 1
[341] 1
[342] 1
[343] 1
[344] 1
[345] 1
[346] 1
[347] 1
[348] 1
[349] 1
[350] 1
[351] 1
[352] 1
[353] 1
[354] 1
[355] 1
[356] 1
[357] 1
[358] 1
[359] 1
[360] 1
[361] 1
[362] 1
[363] 1
[364] 1
[365] 1
[366] 1
[367] 1
[368] 1
[369] 1
[370] 1
[371] 1
[372] 1
[373] 1
[374] 1
[375] 1
[376] 1
[377] 1
[378] 1
[379] 1
[380] 1
[381] 1
[382] 1
[383] 1
[384] 1
[385] 1
[386] 1
[387] 1
[388] 1
[389] 1
[390] 1
[391] 1
[392] 1
[393] 1
[394] 1
[395] 1
[396] 1
[397] 1
[398] 1
[399] 1
[400] 1
[401] 1
[402] 1
[403] 1
[404] 1
[405] 1
[406] 1
[407] 1
[408] 1
[409] 1
[410] 1
[411] 1
[412] 1
[413] 1
[414] 1
[415] 1
[416] 1
[417] 1
[418] 1
[419] 1
[420] 1
[421] 1
[422] 1
[423] 1
[424] 1
[425] 1
[426] 1
[427] 1
[428] 1
[429] 1
[430] 1
[431] 1
[432] 1
[433] 1
[434] 1
[435] 1
[436] 1
[437] 1
[438] 1
[439] 1
[440] 1
[441] 1
[442] 1
[443] 1
[444] 1
[445] 1
[446] 1
[447] 1
[448] 1
[449] 1
[450] 1
[451] 1
[452] 1
[453] 1
[454] 1
[455] 1
[456] 1
[457] 1
[458] 1
[459] 1
[460] 1
[461] 1
[462] 1
[463] 1
[464] 1
[465] 1
[466] 1
[467] 1
[468] 1
[469] 1
[470] 1
[471] 1
[472] 1
[473] 1
[474] 1
[475] 1
[476] 1
[477] 1
[478] 1
[479] 1
[480] 1
[481] 1
[482] 1
[483] 1
[484] 1
[485] 1
[486] 1
[487] 1
[488] 1
[489] 1
[490] 1
[491] 1
[492] 1
[493] 1
[494] 1
[495] 1
[496] 1
[497] 1
[498] 1
[499] 1
[500] 1
[501] 1
[502] 1
[503] 1
[504] 1
[505] 1
[506] 1
[507] 1
[508] 1
[509] 1
[510] 1
[511] 1
[512] 1
[513] 1
[514] 1
[515] 1
[516] 1
[517] 1
[518] 1
[519] 1

```

```

{D[A, x3], D[A, x4], D[A, x5]}
{ ((-0.8 + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^2) + O[x1 - 6.17]^2,
  (((-2.68 + O[x4 - 0.44]^1) + O[x3 - 4.91]^2) + O[x2 - 897.5]^2) + O[x1 - 6.17]^2,
  (((0.053022 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^2) + O[x3 - 4.91]^2) + O[x2 - 897.5]^2) + O[x1 - 6.17]^2}

{2 * Covariance[v][[2, 3]], 2 * Covariance[v][[2, 4]], 2 * Covariance[v][[2, 5]]}
{-476.02, 133.26, -13145.4}

secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza =
{D[A, x2], D[A, x2], D[A, x2]} * {D[A, x3], D[A, x4], D[A, x5]} *
{2 * Covariance[v][[2, 3]], 2 * Covariance[v][[2, 4]], 2 * Covariance[v][[2, 5]]}
{ ((-3.06557 + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^1) + O[x1 - 6.17]^2,
  ((2.87495 + O[x4 - 0.44]^1) + O[x3 - 4.91]^2) + O[x2 - 897.5]^1) + O[x1 - 6.17]^2,
  (((5.61082 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^2) + O[x3 - 4.91]^2) + O[x2 - 897.5]^1) + O[x1 - 6.17]^2}

S22 = secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[1]] +
secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[2]] +
secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[3]]
{ ((5.42021 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^1) + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^1) + O[x1 - 6.17]^2}

{D[A, x3], D[A, x3]}
{ ((-0.8 + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^2) + O[x1 - 6.17]^2,
  ((-0.8 + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^2) + O[x1 - 6.17]^2}

{D[A, x4], D[A, x5]}
{ (((-2.68 + O[x4 - 0.44]^1) + O[x3 - 4.91]^2) + O[x2 - 897.5]^2) + O[x1 - 6.17]^2,
  (((0.053022 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^2) + O[x3 - 4.91]^2) + O[x2 - 897.5]^2) + O[x1 - 6.17]^2}

```

8 | CCRMaggiore240.nb

```

{2 * Covariance[v][[3, 4]], 2 * Covariance[v][[3, 5]]}
{-0.392027, 32.4917}

terzacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza = {D[A, x3], D[A, x3]} *
{D[A, x4], D[A, x5]} * {2 * Covariance[v][[3, 4]], 2 * Covariance[v][[3, 5]]}
{ (((-0.840505 + O[x4 - 0.44]^1) + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^2) + O[x1 - 6.17]^2,
  (((-1.37822 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^2) + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^2) + O[x1 - 6.17]^2}

S23 = terzacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[1]] +
terzacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[2]]
{ (((-2.21872 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^1) + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^2) + O[x1 - 6.17]^2}

2 * Covariance[v][[4, 5]]
-1.61936

S24 = D[A, x4] * D[A, x5] * 2 * Covariance[v][[4, 5]]
{ (((0.230109 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^1) + O[x3 - 4.91]^2) + O[x2 - 897.5]^2) + O[x1 - 6.17]^2}

incertezzagrandezzacorrelata = -1 * (s1 + S21 + S22 + S23 + S24)
{ (((6.42686 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^1) + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^1) + O[x1 - 6.17]^1}

```

Calcolo della incertezza estesa

```

Import["C:\\Documents and Settings\\Administrator\\Desktop\\MATE_STIMA
INCERTEZZA ESTESA\\V85_modello ccr maggiore 240.xls"]

{{{55.0227}, {56.4288}, {52.4239}, {48.7648}, {52.8284}, {58.8797}, {45.3785}, {50.5247},
{49.2242}, {46.5214}, {47.5474}, {49.674}, {46.6378}, {56.0517}, {49.5628},
{53.3097}, {47.8108}, {49.4231}, {58.0892}, {57.4211}, {52.3535}, {52.0227},
{57.3138}, {54.8126}, {47.4898}, {45.1334}, {56.9597}, {49.9985}, {52.2955},
{48.5651}, {47.9337}, {49.3103}, {49.6378}, {57.6454}, {53.4141}, {52.0797},
{49.727}, {51.4031}, {58.7}, {54.4216}, {49.2974}, {49.1982}, {56.4972}, {}, {},
{}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {},
{}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}}}

10 | CCRMaggiore240.nb
w = {{55.02274024449509`}, {56.428788535670535`}, {52.42387413500334`}, {48.76478436314599`},
{52.828414433695684`}, {58.879698092353834`}, {45.37847895382685`}, {50.524700888397206`},
{49.22423093519134`}, {46.52138647501777`}, {47.5474200265231`}, {49.67403459409753`},
{46.63776499128094`}, {56.05169571362205`}, {49.56281156799917`}, {53.30967323519547`},
{47.81078562194915`}, {49.423107942586626`}, {58.089198635620804`}, {57.4211197471238`},
{52.35347528426207`}, {52.02274024449509`}, {57.31378853567053`}, {54.81262413500334`},
{47.489784363145986`}, {45.13341443369569`}, {56.95969809235383`}, {49.99847895382685`},
{52.29548093519134`}, {48.56513647501777`}, {47.9336700265231`}, {49.310284594097524`},
{49.63776499128094`}, {57.64544571362205`}, {53.41406156799917`}, {52.07967323519547`},
{49.72703562194914`}, {51.40310794258663`}, {58.6999955156208`}, {54.42157286712379`},
{49.297396859230126`}, {49.19815323356441`}, {56.497225284262065`}}

{{{55.0227}, {56.4288}, {52.4239}, {48.7648}, {52.8284}, {58.8797}, {45.3785},
{50.5247}, {49.2242}, {46.5214}, {47.5474}, {49.674}, {46.6378}, {56.0517},
{49.5628}, {53.3097}, {47.8108}, {49.4231}, {58.0892}, {57.4211}, {52.3535},
{52.0227}, {57.3138}, {54.8126}, {47.4898}, {45.1334}, {56.9597}, {49.9985},
{52.2955}, {48.5651}, {47.9337}, {49.3103}, {49.6378}, {57.6454}, {53.4141},
{52.0797}, {49.727}, {51.4031}, {58.7}, {54.4216}, {49.2974}, {49.1982}, {56.4972}}

Mean[w]
{51.8078}

k1 = 1
1
uy = Sqrt[incertezzagrandezzacorrelata]
{(((2.53512 + 0[x5 - 74.42]1) + 0[x4 - 0.44]1) + 0[x3 - 4.91]1) + 0[x2 - 897.5]1) + 0[x1 - 6.17]1}

Mean[w] + k1 * uy
{(((54.3429 + 0[x5 - 74.42]1) + 0[x4 - 0.44]1) + 0[x3 - 4.91]1) + 0[x2 - 897.5]1) + 0[x1 - 6.17]1}

```



```

Mean[w] - k1 * uy
{ ((( (49.2727 + O[x5 - 74.42]1) + O[x4 - 0.44]1) + O[x3 - 4.91]1) + O[x2 - 897.5]1) + O[x1 - 6.17]1 }

Import["C:\\Documents and Settings\\Administrator\\Desktop\\MATE_STIMA
INCERTEZZA ESTESA\\V85_reale ccr maggiore 240.xls"]

{{{49.}, {49.75}, {49.15}, {46.}, {46.4}, {58.}, {43.5}, {45.75}, {50.9}, {41.}, {46.}, {51.3},
{43.15}, {52.}, {47.}, {51.75}, {42.35}, {54.85}, {58.}, {56.1}, {46.6}, {47.75},
{63.}, {59.}, {44.7}, {47.8}, {60.9}, {48.}, {58.}, {45.}, {50.3}, {48.}, {42.1},
{70.}, {48.15}, {54.}, {44.6}, {55.3}, {64.}, {50.6}, {45.}, {45.}, {48.}, {}, {}, {},
{}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {},
{}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}}}

T = Transpose[{{49.}, {49.75}, {49.15}, {46.}, {46.4}, {58.}, {43.5},
{45.75}, {50.9}, {41.}, {46.}, {51.3}, {43.15}, {52.}, {47.}, {51.75},
{42.35}, {54.85}, {58.}, {56.1}, {46.6}, {47.75}, {63.}, {59.}, {44.7},
{47.8}, {60.9}, {48.}, {58.}, {45.}, {50.3}, {48.}, {42.1}, {70.},
{48.15}, {54.}, {44.6}, {55.3}, {64.}, {50.6}, {45.}, {45.}, {48.}}]

{{49., 49.75, 49.15, 46., 46.4, 58., 43.5, 45.75, 50.9, 41., 46., 51.3, 43.15, 52.,
47., 51.75, 42.35, 54.85, 58., 56.1, 46.6, 47.75, 63., 59., 44.7, 47.8, 60.9, 48.,
58., 45., 50.3, 48., 42.1, 70., 48.15, 54., 44.6, 55.3, 64., 50.6, 45., 45., 48.}}

P = {49., 49.75, 49.15, 46., 46.4, 58., 43.5, 45.75, 50.9,
41., 46., 51.3, 43.15, 52., 47., 51.75, 42.35, 54.85, 58., 56.1,
46.6, 47.75, 63., 59., 44.7, 47.8, 60.9, 48., 58., 45., 50.3,
48., 42.1, 70., 48.15, 54., 44.6, 55.3, 64., 50.6, 45., 45., 48.}

{49., 49.75, 49.15, 46., 46.4, 58., 43.5, 45.75, 50.9, 41., 46., 51.3, 43.15, 52.,
47., 51.75, 42.35, 54.85, 58., 56.1, 46.6, 47.75, 63., 59., 44.7, 47.8, 60.9, 48.,
58., 45., 50.3, 48., 42.1, 70., 48.15, 54., 44.6, 55.3, 64., 50.6, 45., 45., 48.}

```

12 | CCRMaggiore240.nb

```

Length[P]
43

S1 = Select[{49., 49.75, 49.15, 46., 46.4, 58., 43.5, 45.75, 50.9, 41., 46., 51.3,
43.15, 52., 47., 51.75, 42.35, 54.85, 58., 56.1, 46.6, 47.75, 63., 59.,
44.7, 47.8, 60.9, 48., 58., 45., 50.3, 48., 42.1, 70., 48.15, 54., 44.6,
55.3, 64., 50.6, 45., 45., 48.}, 54.34290858452098 > # > 49.27265969634015 &]

{49.75, 50.9, 51.3, 52., 51.75, 50.3, 54., 50.6}

Length[S1]
8

Percentualepuntiinfascia1 = Length[S1] * 100;
Percentualepuntiinfascia1 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia1
800
43

k2 = 2
2

Mean[w] + k2 * uy
{ ((( (56.878 + O[x5 - 74.42]1) + O[x4 - 0.44]1) + O[x3 - 4.91]1) + O[x2 - 897.5]1) + O[x1 - 6.17]1 }

Mean[w] - k2 * uy
{ ((( (46.7375 + O[x5 - 74.42]1) + O[x4 - 0.44]1) + O[x3 - 4.91]1) + O[x2 - 897.5]1) + O[x1 - 6.17]1 }

S2 = Select[{49., 49.75, 49.15, 46., 46.4, 58., 43.5, 45.75, 50.9, 41., 46., 51.3,
43.15, 52., 47., 51.75, 42.35, 54.85, 58., 56.1, 46.6, 47.75, 63., 59.,
44.7, 47.8, 60.9, 48., 58., 45., 50.3, 48., 42.1, 70., 48.15, 54., 44.6,
55.3, 64., 50.6, 45., 45., 48.}, 56.8780330286114 > # > 46.73753525224973 &]

{49., 49.75, 49.15, 50.9, 51.3, 52., 47., 51.75, 54.85,
56.1, 47.75, 47.8, 48., 50.3, 48., 48.15, 54., 55.3, 50.6, 48.}

```

```

Length[S2]
20

Percentualepuntiinfascia2 = Length[S2] * 100;
Percentualepuntiinfascia2 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia2
2000
43

k3 = 3
3

Mean[w] + k3 * uy
{ ((( (59.4132 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^1) + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^1) + O[x1 - 6.17]^1 }

Mean[w] - k3 * uy
{ ((( (44.2024 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^1) + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^1) + O[x1 - 6.17]^1 }

S3 = Select[{49.`, 49.75`, 49.15`, 46.`, 46.4`, 58.`, 43.5`, 45.75`, 50.9`, 41.`, 46.`, 51.3`,
43.15`, 52.`, 47.`, 51.75`, 42.35`, 54.85`, 58.`, 56.1`, 46.6`, 47.75`, 63.`, 59.`,
44.7`, 47.8`, 60.9`, 48.`, 58.`, 45.`, 50.3`, 48.`, 42.1`, 70.`, 48.15`, 54.`, 44.6`,
55.3`, 64.`, 50.6`, 45.`, 45.`, 48.`, 59.41315747270181` > # > 44.202410808159314` &]
{49., 49.75, 49.15, 46., 46.4, 58., 45.75, 50.9, 46., 51.3,
52., 47., 51.75, 54.85, 58., 56.1, 46.6, 47.75, 59., 44.7, 47.8, 48.,
58., 45., 50.3, 48., 48.15, 54., 44.6, 55.3, 50.6, 45., 45., 48.}

Length[S3]
34

Percentualepuntiinfascia3 = Length[S3] * 100;
Percentualepuntiinfascia3 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia3
3400
43

```

14 | CCRMaggiore240.nb

```

k4 = 4
4

Mean[w] + k4 * uy
{ ((( (61.9483 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^1) + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^1) + O[x1 - 6.17]^1 }

Mean[w] - k4 * uy
{ ((( (41.6673 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^1) + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^1) + O[x1 - 6.17]^1 }

S4 = Select[{49.`, 49.75`, 49.15`, 46.`, 46.4`, 58.`, 43.5`, 45.75`, 50.9`, 41.`, 46.`, 51.3`,
43.15`, 52.`, 47.`, 51.75`, 42.35`, 54.85`, 58.`, 56.1`, 46.6`, 47.75`, 63.`, 59.`,
44.7`, 47.8`, 60.9`, 48.`, 58.`, 45.`, 50.3`, 48.`, 42.1`, 70.`, 48.15`, 54.`, 44.6`,
55.3`, 64.`, 50.6`, 45.`, 45.`, 48.`, 61.94828191679223` > # > 41.66728636406889` &]
{49., 49.75, 49.15, 46., 46.4, 58., 43.5, 45.75, 50.9, 46., 51.3, 43.15,
52., 47., 51.75, 42.35, 54.85, 58., 56.1, 46.6, 47.75, 59., 44.7, 47.8, 60.9,
48., 58., 45., 50.3, 48., 42.1, 48.15, 54., 44.6, 55.3, 50.6, 45., 45., 48.}

Length[S4]
39

Percentualepuntiinfascia4 = Length[S4] * 100;
Percentualepuntiinfascia4 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia4
3900
43

k5 = 5
5

Mean[w] + k5 * uy
{ ((( (64.4834 + O[x5 - 74.42]^1) + O[x4 - 0.44]^1) + O[x3 - 4.91]^1) + O[x2 - 897.5]^1) + O[x1 - 6.17]^1 }

```

Mean[w] - k5 * uy

{ ((((39.1322 + O[x5 - 74.42]¹) + O[x4 - 0.44]¹) + O[x3 - 4.91]¹) + O[x2 - 897.5]¹) + O[x1 - 6.17]¹}

S5 = Select[{49.`, 49.75`, 49.15`, 46.`, 46.4`, 58.`, 43.5`, 45.75`, 50.9`, 41.`, 46.`, 51.3`, 43.15`, 52.`, 47.`, 51.75`, 42.35`, 54.85`, 58.`, 56.1`, 46.6`, 47.75`, 63.`, 59.`, 44.7`, 47.8`, 60.9`, 48.`, 58.`, 45.`, 50.3`, 48.`, 42.1`, 70.`, 48.15`, 54.`, 44.6`, 55.3`, 64.`, 50.6`, 45.`, 45.`, 48.}], 64.48340636088265` > # > 39.13216191997848` &]

{49., 49.75, 49.15, 46., 46.4, 58., 43.5, 45.75, 50.9, 41., 46., 51.3, 43.15, 52., 47., 51.75, 42.35, 54.85, 58., 56.1, 46.6, 47.75, 63., 59., 44.7, 47.8, 60.9, 48., 58., 45., 50.3, 48., 42.1, 48.15, 54., 44.6, 55.3, 64., 50.6, 45., 45., 48.}

Length[S5]

42

Percentualepuntiinfascia5 = Length[S5] * 100;

Percentualepuntiinfascia5 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia5

4200

43

k6 = 6

6

Mean[w] + k6 * uy

{ ((((67.0185 + O[x5 - 74.42]¹) + O[x4 - 0.44]¹) + O[x3 - 4.91]¹) + O[x2 - 897.5]¹) + O[x1 - 6.17]¹}

Mean[w] - k6 * uy

{ ((((36.597 + O[x5 - 74.42]¹) + O[x4 - 0.44]¹) + O[x3 - 4.91]¹) + O[x2 - 897.5]¹) + O[x1 - 6.17]¹}

16 | CCRMaggiore240.nb

S6 = Select[{49.`, 49.75`, 49.15`, 46.`, 46.4`, 58.`, 43.5`, 45.75`, 50.9`, 41.`, 46.`, 51.3`, 43.15`, 52.`, 47.`, 51.75`, 42.35`, 54.85`, 58.`, 56.1`, 46.6`, 47.75`, 63.`, 59.`, 44.7`, 47.8`, 60.9`, 48.`, 58.`, 45.`, 50.3`, 48.`, 42.1`, 70.`, 48.15`, 54.`, 44.6`, 55.3`, 64.`, 50.6`, 45.`, 45.`, 48.}], 67.01853080497307` > # > 36.59703747588806` &]

{49., 49.75, 49.15, 46., 46.4, 58., 43.5, 45.75, 50.9, 41., 46., 51.3, 43.15, 52., 47., 51.75, 42.35, 54.85, 58., 56.1, 46.6, 47.75, 63., 59., 44.7, 47.8, 60.9, 48., 58., 45., 50.3, 48., 42.1, 48.15, 54., 44.6, 55.3, 64., 50.6, 45., 45., 48.}

Length[S6]

42

k7 = 7

7

Mean[w] + k7 * uy

{ ((((69.5537 + O[x5 - 74.42]¹) + O[x4 - 0.44]¹) + O[x3 - 4.91]¹) + O[x2 - 897.5]¹) + O[x1 - 6.17]¹}

Mean[w] - k7 * uy

{ ((((34.0619 + O[x5 - 74.42]¹) + O[x4 - 0.44]¹) + O[x3 - 4.91]¹) + O[x2 - 897.5]¹) + O[x1 - 6.17]¹}

S7 = Select[{49.`, 49.75`, 49.15`, 46.`, 46.4`, 58.`, 43.5`, 45.75`, 50.9`, 41.`, 46.`, 51.3`, 43.15`, 52.`, 47.`, 51.75`, 42.35`, 54.85`, 58.`, 56.1`, 46.6`, 47.75`, 63.`, 59.`, 44.7`, 47.8`, 60.9`, 48.`, 58.`, 45.`, 50.3`, 48.`, 42.1`, 70.`, 48.15`, 54.`, 44.6`, 55.3`, 64.`, 50.6`, 45.`, 45.`, 48.}], 69.55365524906348` > # > 34.061913031797644` &]

{49., 49.75, 49.15, 46., 46.4, 58., 43.5, 45.75, 50.9, 41., 46., 51.3, 43.15, 52., 47., 51.75, 42.35, 54.85, 58., 56.1, 46.6, 47.75, 63., 59., 44.7, 47.8, 60.9, 48., 58., 45., 50.3, 48., 42.1, 48.15, 54., 44.6, 55.3, 64., 50.6, 45., 45., 48.}

Length[S7]

42

```

k8 = 8
8

Mean[w] + k8 * uy
{ ((( (72.0888 + O[x5 - 74.42]1) + O[x4 - 0.44]1) + O[x3 - 4.91]1) + O[x2 - 897.5]1) + O[x1 - 6.17]1 }

Mean[w] - k8 * uy
{ ((( (31.5268 + O[x5 - 74.42]1) + O[x4 - 0.44]1) + O[x3 - 4.91]1) + O[x2 - 897.5]1) + O[x1 - 6.17]1 }

S8 = Select[{49.`, 49.75`, 49.15`, 46.`, 46.4`, 58.`, 43.5`, 45.75`, 50.9`, 41.`, 46.`, 51.3`,
43.15`, 52.`, 47.`, 51.75`, 42.35`, 54.85`, 58.`, 56.1`, 46.6`, 47.75`, 63.`, 59.`,
44.7`, 47.8`, 60.9`, 48.`, 58.`, 45.`, 50.3`, 48.`, 42.1`, 70.`, 48.15`, 54.`, 44.6`,
55.3`, 64.`, 50.6`, 45.`, 45.`, 48.`, 72.0887796931539` > # > 31.526788587707227` &]
{49., 49.75, 49.15, 46., 46.4, 58., 43.5, 45.75, 50.9, 41., 46., 51.3, 43.15, 52.,
47., 51.75, 42.35, 54.85, 58., 56.1, 46.6, 47.75, 63., 59., 44.7, 47.8, 60.9, 48.,
58., 45., 50.3, 48., 42.1, 70., 48.15, 54., 44.6, 55.3, 64., 50.6, 45., 45., 48.}

Length[S8]
43

Percentualepuntiinfascia8 = Length[S8] * 100;
Percentualepuntiinfascia8 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia8
100

```

Linearizzazione del Modello predittivo della Velocità Operativa in curva con CCR<240 gon/Km

```

B = Series[55.88 + 5.54 * x1 - 0.038 * x2 + (10^-5) * x2^2 - 0.03 * x3 -
0.51 * x4 - 4.64 * x5 + 7.3 * (10^-4) * x6 - 0.063 * x7, {x1, 6.32, 1}, {x2, 510.01, 1},
{x3, 73.8, 1}, {x4, 5.22, 1}, {x5, 0.37, 1}, {x6, 526.2, 1}, {x7, 120.29, 1}]
(((60.3264 - 0.063 (x7 - 120.29) + O[x7 - 120.29]^2) + 0.00073 (x6 - 526.2) + O[x6 - 526.2]^2) -
4.64 (x5 - 0.37) + O[x5 - 0.37]^2) - 0.51 (x4 - 5.22) + O[x4 - 5.22]^2) - 0.03 (x3 - 73.8) +
O[x3 - 73.8]^2) - 0.0277998 (x2 - 510.01) + O[x2 - 510.01]^2) + 5.54 (x1 - 6.32) + O[x1 - 6.32]^2

dx1 = FullSimplify[D[B, x1]] ;; {D[B, x1]^2}
{5.54 + O[x1 - 6.32]^1} ;; {30.6916 + O[x1 - 6.32]^1}

dx2 = FullSimplify[D[B, x2]] ;; {D[B, x2]^2}
{(-0.0277998 + O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2} ;; {(0.000772829 + O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2}

dx3 = FullSimplify[D[B, x3]] ;; {D[B, x3]^2}
{((-0.03 + O[x3 - 73.8]^1) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}
;; {(0.0009 + O[x3 - 73.8]^1) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}

dx4 = FullSimplify[D[B, x4]] ;; {D[B, x4]^2}
{((-0.51 + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}
;; {(0.2601 + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}

dx5 = FullSimplify[D[B, x5]] ;; {D[B, x5]^2}
{((-4.64 + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2} ;;
{((21.5296 + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}

2| CCRminore240.nb
dx6 = FullSimplify[D[B, x6]] ;; {D[B, x6]^2}
{(((0.00073 + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) +
O[x1 - 6.32]^2} ;;
{(((5.329 * 10^-7 + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) +
O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}

dx7 = FullSimplify[D[B, x7]] ;; {D[B, x7]^2}
{(((0.063 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^2) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) +
O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2} ;;
{(((0.003969 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^2) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) +
O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}

Import["C:\\Documents and
Settings\\Administrator\\Desktop\\matematica file\\mate CCR minore 240.xls"]
{{{5., 318.31, 47.93, 0., 0., 65.37, 9.60123}, {5.67, 227.364, 57.36, 0., 1., 65.37, 9.60123},
{6.58, 211.425, 66., 15., 1., 258., 159.277}, {6., 637.103, 113., 15., 0., 409.7, 159.277},
{6., 1154.21, 56., 15., 0., 409.7, 159.277}, {7.5, 318.095, 37., 14., 0., 619., 159.277},
{7.5, 316.857, 51., 14., 0., 619., 159.277}, {7., 633.539, 57., 14., 0., 166., 159.277},
{7., 160.07, 70., 14., 1., 166., 159.277}, {6., 637.103, 113., 15., 0., 630.2, 159.277},
{6., 1154.21, 56., 15., 0., 630.2, 159.277}, {7., 633.539, 57., 14., 0., 304., 159.277},
{7., 160.07, 70., 14., 1., 304., 159.277}, {6.63, 640.269, 74., 4., 1., 4699., 9.9159},
{6.63, 640.269, 74., 4., 1., 1725., 9.9159}, {6.78, 439.048, 144.95, 14., 1., 1313., 47.1557},
{5.91, 318.31, 64.124, 8., 0., 2827., 47.1557}, {5., 1273.24, 42.94, 11., 1., 715., 47.1557},

```


{5.46, 212.207, 62., 3., 0., 715., 47.1557}, {5.46, 636.62, 34., 3., 0., 715., 47.1557},
 {6.78, 439.048, 144.95, 14., 1., 2827., 47.1557},
 {5.91, 318.31, 64.124, 8., 0., 998.5, 47.1557}, {5., 1273.24, 42.94, 11., 1., 715., 47.1557},
 {5.46, 212.207, 62., 3., 0., 285.5, 47.1557}, {5.46, 636.62, 34., 3., 0., 285.5, 47.1557},
 {5.5, 578.745, 78., 4., 0., 385., 47.1557}, {6.22, 1061.03, 73.04, 1., 1., 249.953, 63.2875},
 {7., 141.471, 218., 1., 0., 249.953, 63.2875}, {7., 254.648, 79.6, 1., 0., 249.953, 63.2875},
 {6., 159.155, 108., 0., 0., 523., 63.2875}, {6.5, 265.258, 119.34, 0., 1., 182., 63.2875},
 {6.5, 424.413, 41.58, 0., 0., 82.77, 63.2875}, {6.5, 335.063, 42.33, 0., 0., 82.77, 63.2875},
 {6.5, 254.648, 56.05, 0., 0., 82.77, 235.793}, {6.5, 636.62, 33.39, 1., 0., 82.77, 235.793},
 {6.5, 636.62, 57.79, 1., 0., 82.77, 235.793}, {6.5, 318.31, 65.94, 1., 0., 82.77, 235.793},
 {6.5, 353.678, 91.499, 1., 1., 82.77, 235.793}, {6.5, 909.457, 55.39, 1., 1., 82.77, 235.793},
 {6.22, 707.355, 32.7, 1., 1., 249.953, 63.2875},
 {6.22, 1061.03, 73.04, 1., 1., 249.953, 63.2875}, {7., 141.471, 218., 1., 0., 523., 63.2875},
 {6., 159.155, 108., 0., 0., 182., 63.2875}, {6.5, 265.258, 119.34, 0., 1., 82.77, 63.2875},
 {6.5, 254.648, 56.05, 0., 0., 82.77, 235.793}, {6.5, 636.62, 37.47, 1., 0., 82.77, 235.793},
 {6.5, 636.62, 33.39, 1., 0., 82.77, 235.793}, {6.5, 636.62, 57.79, 1., 0., 82.77, 235.793},
 {6.5, 318.31, 65.94, 1., 0., 82.77, 235.793}, {6.5, 353.678, 91.499, 1., 1., 82.77, 235.793},
 {6.5, 909.457, 55.39, 1., 1., 82.77, 235.793}, {,,,,,,}, {,,,,,,},
 {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,},
 {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,},
 {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,}, {,,,,,,}

```
4 | CCriminore240.sh
{6.58`, 211.42530303030303`, 66.`, 15.`, 1.`, 258.`, 159.277252027187`},
{6.`, 637.1027433628319`, 113.`, 15.`, 0.`, 409.7`, 159.277252027187`},
{6.`, 1154.2075`, 56.`, 15.`, 0.`, 409.7`, 159.277252027187`},
{7.5`, 318.0945945945946`, 37.`, 14.`, 0.`, 619.`, 159.277252027187`},
{7.5`, 318.85666666666667`, 51.`, 14.`, 0.`, 619.`, 159.277252027187`},
{7.`, 636.539298245614`, 57.`, 14.`, 0.`, 166.`, 159.277252027187`},
{7.`, 160.0695714285714`, 70.`, 14.`, 1.`, 166.`, 159.277252027187`},
{6.`, 637.1027433628319`, 113.`, 15.`, 0.`, 630.2`, 159.277252027187`},
{6.`, 1154.2075`, 56.`, 15.`, 0.`, 630.2`, 159.277252027187`},
{7.`, 633.539298245614`, 57.`, 14.`, 0.`, 304.`, 159.277252027187`},
{7.`, 160.0695714285714`, 70.`, 14.`, 1.`, 304.`, 159.277252027187`},
{6.63`, 640.2690540540541`, 74.`, 4.`, 1.`, 4699.`, 9.9159023`},
{6.63`, 640.2690540540541`, 74.`, 4.`, 1.`, 1725.`, 9.9159023`},
{6.78`, 439.0481188741941`, 144.95`, 14.`, 1.`, 1313.`, 47.155702512`},
{5.91`, 318.30988618379064`, 64.124`, 8.`, 0.`, 2827.`, 47.155702512`},
{5.`, 1273.2395447351626`, 42.94`, 11.`, 1.`, 715.`, 47.155702512`},
{5.46`, 212.20659078919377`, 62.`, 3.`, 0.`, 715.`, 47.155702512`},
{5.46`, 636.6197723675814`, 34.`, 3.`, 0.`, 715.`, 47.155702512`},
{6.78`, 439.0481188741941`, 144.95`, 14.`, 1.`, 2827.`, 47.155702512`},
{5.91`, 318.30988618379064`, 64.124`, 8.`, 0.`, 998.5`, 47.155702512`},
{5.`, 1273.2395447351626`, 42.94`, 11.`, 1.`, 715.`, 47.155702512`},
{5.46`, 212.20659078919377`, 62.`, 3.`, 0.`, 285.500000000000074`, 47.155702512`}
```

```
{5.46`, 636.6197723675814`, 34.`, 3.`, 0.`, 285.50000000000074`, 47.155702512`},
{5.5`, 578.745247606892`, 78.`, 4.`, 0.`, 385.`, 47.155702512`},
{6.22`, 1061.032953945969`, 73.04`, 1.`, 1.`, 249.95299999999997`, 63.2875295795849`},
{7.`, 141.47106052612918`, 218.`, 1.`, 0.`, 249.95299999999997`, 63.2875295795849`},
{7.`, 254.6479089470325`, 79.6`, 1.`, 0.`, 249.95299999999997`, 63.2875295795849`},
{6.`, 159.15494309189532`, 108.`, 0.`, 0.`, 523.`, 63.2875295795849`},
{6.5`, 265.25823848649225`, 119.34`, 0.`, 1.`, 182.`, 63.2875295795849`},
{6.5`, 424.41318157838754`, 41.58`, 0.`, 0.`, 82.77`, 63.2875295795849`},
{6.5`, 335.0630380882007`, 42.33`, 0.`, 0.`, 82.77`, 63.2875295795849`},
{6.5`, 254.64790894703253`, 56.05`, 0.`, 0.`, 82.77`, 235.793432461067`},
{6.5`, 636.6197723675814`, 33.39`, 1.`, 0.`, 82.77`, 235.793432461067`},
{6.5`, 636.6197723675813`, 57.79`, 1.`, 0.`, 82.77`, 235.793432461067`},
{6.5`, 318.3098861837907`, 65.94`, 1.`, 0.`, 82.77`, 235.793432461067`},
{6.5`, 353.677651315323`, 91.499`, 1.`, 1.`, 82.77`, 235.793432461067`},
{6.5`, 909.4568176679733`, 55.39`, 1.`, 1.`, 82.77`, 235.793432461067`},
{6.22`, 707.355302630646`, 32.7`, 1.`, 1.`, 249.95299999999997`, 63.2875295795849`},
{6.22`, 1061.032953945969`, 73.04`, 1.`, 1.`, 249.95299999999997`, 63.2875295795849`},
{7.`, 141.47106052612918`, 218.`, 1.`, 0.`, 523.`, 63.2875295795849`},
{6.`, 159.15494309189532`, 108.`, 0.`, 0.`, 182.`, 63.2875295795849`},
{6.5`, 265.25823848649225`, 119.34`, 0.`, 1.`, 82.77`, 63.2875295795849`},
{6.5`, 254.64790894703253`, 56.05`, 0.`, 0.`, 82.77`, 235.793432461067`},
{6.5`, 636.6197723675813`, 37.47`, 1.`, 0.`, 82.77`, 235.793432461067`},
```

6 | CCRMmine240.nb

```
{6.5`, 636.6197723675814`, 33.39`, 1.`, 0.`, 82.77`, 235.793432461067`},
{6.5`, 636.6197723675813`, 57.79`, 1.`, 0.`, 82.77`, 235.793432461067`},
{6.5`, 318.3098861837907`, 65.94`, 1.`, 0.`, 82.77`, 235.793432461067`},
{6.5`, 353.677651315323`, 91.499`, 1.`, 1.`, 82.77`, 235.793432461067`},
{6.5`, 909.4568176679733`, 55.39`, 1.`, 1.`, 82.77`, 235.793432461067`}}
```

```
{ {5., 318.31, 47.93, 0., 0., 65.37, 9.60123}, {5.67, 227.364, 57.36, 0., 1., 65.37, 9.60123},
{6.58, 211.425, 66., 15., 1., 258., 159.277}, {6., 637.103, 113., 15., 0., 409.7, 159.277},
{6., 1154.21, 56., 15., 0., 409.7, 159.277}, {7.5, 318.095, 37., 14., 0., 619., 159.277},
{7.5, 316.857, 51., 14., 0., 619., 159.277}, {7., 633.539, 57., 14., 0., 166., 159.277},
{7., 160.07, 70., 14., 1., 166., 159.277}, {6., 637.103, 113., 15., 0., 630.2, 159.277},
{6., 1154.21, 56., 15., 0., 630.2, 159.277}, {7., 633.539, 57., 14., 0., 304., 159.277},
{7., 160.07, 70., 14., 1., 304., 159.277}, {6.63, 640.269, 74., 4., 1., 4699., 9.9159},
{6.63, 640.269, 74., 4., 1., 1725., 9.9159}, {6.78, 439.048, 144.95, 14., 1., 1313., 47.1557},
{5.91, 318.31, 64.124, 8., 0., 2827., 47.1557}, {5., 1273.24, 42.94, 11., 1., 715., 47.1557},
{5.46, 212.207, 62., 3., 0., 715., 47.1557}, {5.46, 636.62, 34., 3., 0., 715., 47.1557},
{6.78, 439.048, 144.95, 14., 1., 2827., 47.1557},
{5.91, 318.31, 64.124, 8., 0., 998.5, 47.1557}, {5., 1273.24, 42.94, 11., 1., 715., 47.1557},
{5.46, 212.207, 62., 3., 0., 285.5, 47.1557}, {5.46, 636.62, 34., 3., 0., 285.5, 47.1557},
{5.5, 578.745, 78., 4., 0., 385., 47.1557}, {6.22, 1061.03, 73.04, 1., 1., 249.953, 63.2875},
{7., 141.471, 218., 1., 0., 249.953, 63.2875}, {7., 254.648, 79.6, 1., 0., 249.953, 63.2875},
{6., 159.155, 108., 0., 0., 523., 63.2875}, {6.5, 265.258, 119.34, 0., 1., 182., 63.2875},
{6.5, 424.413, 41.58, 0., 0., 82.77, 63.2875}, {6.5, 335.063, 42.33, 0., 0., 82.77, 63.2875},
{6.5, 254.648, 56.05, 0., 0., 82.77, 235.793}, {6.5, 636.62, 33.39, 1., 0., 82.77, 235.793},
{6.5, 636.62, 57.79, 1., 0., 82.77, 235.793}, {6.5, 318.31, 65.94, 1., 0., 82.77, 235.793},
{6.5, 353.678, 91.499, 1., 1., 82.77, 235.793}, {6.5, 909.457, 55.39, 1., 1., 82.77, 235.793},
{6.22, 707.355, 32.7, 1., 1., 249.953, 63.2875},
{6.22, 1061.03, 73.04, 1., 1., 249.953, 63.2875},
{7., 141.471, 218., 1., 0., 523., 63.2875}, {6., 159.155, 108., 0., 0., 182., 63.2875},
{6.5, 265.258, 119.34, 0., 1., 82.77, 63.2875}, {6.5, 254.648, 56.05, 0., 0., 82.77, 235.793},
{6.5, 636.62, 37.47, 1., 0., 82.77, 235.793}, {6.5, 636.62, 33.39, 1., 0., 82.77, 235.793},
{6.5, 636.62, 57.79, 1., 0., 82.77, 235.793}, {6.5, 318.31, 65.94, 1., 0., 82.77, 235.793},
{6.5, 353.678, 91.499, 1., 1., 82.77, 235.793}, {6.5, 909.457, 55.39, 1., 1., 82.77, 235.793}}
```

8 | CCRminore240.nb

MatrixForm[Covariance[v]]

$$\begin{pmatrix} 0.350328 & -63.5138 & 6.4419 & 0.506698 & 0.0124784 & 8.10648 & 19.4352 \\ -63.5138 & 99068.1 & -4581.1 & 399.97 & 33.2004 & 15329.2 & 1552.84 \\ 6.4419 & -4581.1 & 1636.78 & 1.31871 & 1.92299 & 5040.05 & -765.495 \\ 0.506698 & 399.97 & 1.31871 & 35.5325 & 0.178039 & 1316.13 & 4.97363 \\ 0.0124784 & 33.2004 & 1.92299 & 0.178039 & 0.238431 & 82.7061 & -6.59852 \\ 8.10648 & 15329.2 & 5040.05 & 1316.13 & 82.7061 & 704855. & -29009. \\ 19.4352 & 1552.84 & -765.495 & 4.97363 & -6.59852 & -29009. & 6736.98 \end{pmatrix}$$

Import["C:\\Documents and

Settings\\Administrator\\Desktop\\matematica file\\ux CCR minore 240.xls"]

```
{{{0.00686918, 1942.51, 32.0937, 0.696717, 0.00467512, 13820.7, 132.098},
{, , , , , , , }, {, , , , , , , }, {, , , , , , , }, {, , , , , , , }, {, , , , , , , }, {, , , , , , , },
{, , , , , , , }, {, , , , , , , }, {, , , , , , , }, {, , , , , , , }, {, , , , , , , }, {, , , , , , , },
{, , , , , , , }, {, , , , , , , }, {, , , , , , , }, {, , , , , , , }, {, , , , , , , }, {, , , , , , , }}}

s = {0.006869178008458256`, 1942.5111593852905`, 32.093708682645165`,
0.6967166474432911`, 0.00467512495194156`, 13820.69115730773`, 132.09755773571155`}

{0.00686918, 1942.51, 32.0937, 0.696717, 0.00467512, 13820.7, 132.098}

u = {{s[[1]]}, {s[[2]]}, {s[[3]]}, {s[[4]]}, {s[[5]]}, {s[[6]]}, {s[[7]]}}
{{0.00686918}, {1942.51}, {32.0937}, {0.696717}, {0.00467512}, {13820.7}, {132.098}}
```



```

f = {D[B, x1] ^ 2, D[B, x2] ^ 2, D[B, x3] ^ 2, D[B, x4] ^ 2, D[B, x5] ^ 2, D[B, x6] ^ 2, D[B, x7] ^ 2}
{30.6916 + O[x1 - 6.32]^1, (0.000772829 + O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2,
 ((0.0009 + O[x3 - 73.8]^1) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
 (((0.2601 + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
 (((((21.5296 + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
 ((((((5.329 × 10^-7 + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) +
 O[x1 - 6.32]^2,
 (((((((0.003969 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^2) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) +
 O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}

s1 = primacomponenteprimomembroequazionegeneraleincertezza = f.u
{((((((2.55447 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^1) +
 O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^1}

{D[B, x1], D[B, x1], D[B, x1], D[B, x1], D[B, x1], D[B, x1]}
{5.54 + O[x1 - 6.32]^1, 5.54 + O[x1 - 6.32]^1, 5.54 + O[x1 - 6.32]^1,
 5.54 + O[x1 - 6.32]^1, 5.54 + O[x1 - 6.32]^1, 5.54 + O[x1 - 6.32]^1}

{D[B, x2], D[B, x3], D[B, x4], D[B, x5], D[B, x6], D[B, x7]}
{(-0.0277998 + O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2,
 ((-0.03 + O[x3 - 73.8]^1) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
 (((-0.51 + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
 (((((-4.64 + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
 ((((((0.00073 + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) +
 O[x1 - 6.32]^2,
 ((((((((-0.063 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^2) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) +
 O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}

10 | CCRMinsre240.nb
{2 * Covariance[v][[1, 2]], 2 * Covariance[v][[1, 3]], 2 * Covariance[v][[1, 4]],
2 * Covariance[v][[1, 5]], 2 * Covariance[v][[1, 6]], 2 * Covariance[v][[1, 7]]}
{-127.028, 12.8838, 1.0134, 0.0249569, 16.213, 38.8704}

primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza =
{D[B, x1], D[B, x1], D[B, x1], D[B, x1], D[B, x1], D[B, x1]} *
{D[B, x2], D[B, x3], D[B, x4], D[B, x5], D[B, x6], D[B, x7]} *
{2 * Covariance[v][[1, 2]], 2 * Covariance[v][[1, 3]], 2 * Covariance[v][[1, 4]],
2 * Covariance[v][[1, 5]], 2 * Covariance[v][[1, 6]], 2 * Covariance[v][[1, 7]]}
{(19.5636 + O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^1,
 ((-2.14129 + O[x3 - 73.8]^1) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^1,
 (((-2.86325 + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^1,
 (((((-0.641531 + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^1,
 ((((((0.0655685 + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) +
 O[x1 - 6.32]^1,
 ((((((((-13.5666 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^2) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) +
 O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^1}

S21 = primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[1]] +
primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[2]] +
primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[3]] +
primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[4]] +
primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[5]] +
primacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[6]]
{((((((0.416598 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^1) +
 O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^1}

```

```

{D[B, x2], D[B, x2], D[B, x2], D[B, x2], D[B, x2]}
{(-0.0277998 + O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2,
 (-0.0277998 + O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2, (-0.0277998 + O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2,
 (-0.0277998 + O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2, (-0.0277998 + O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2}

{D[B, x3], D[B, x4], D[B, x5], D[B, x6], D[B, x7]}
{((-0.03 + O[x3 - 73.8]^1) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
 (((-0.51 + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
 ((((-4.64 + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
 ((((((0.00073 + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) +
 O[x1 - 6.32]^2,
 (((((( -0.063 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^2) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) +
 O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}

{2 * Covariance[v][[2, 3]], 2 * Covariance[v][[2, 4]],
 2 * Covariance[v][[2, 5]], 2 * Covariance[v][[2, 6]], 2 * Covariance[v][[2, 7]]}
{-9162.2, 799.94, 66.4007, 30 658.4, 3105.68}

```

12 | CCRMinsre240.nb

```

secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza =
{D[B, x2], D[B, x2], D[B, x2], D[B, x2], D[B, x2]} *
{D[B, x3], D[B, x4], D[B, x5], D[B, x6], D[B, x7]} *
{2 * Covariance[v][[2, 3]], 2 * Covariance[v][[2, 4]], 2 * Covariance[v][[2, 5]],
 2 * Covariance[v][[2, 6]], 2 * Covariance[v][[2, 7]]}
{((-7.64122 + O[x3 - 73.8]^1) + O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2,
 (((11.3415 + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2,
 (((((8.5651 + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2,
 (((((( -0.622177 + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^1) +
 O[x1 - 6.32]^2,
 (((((( 5.43925 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^2) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) +
 O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2}

S22 = secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[1]] +
secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[2]] +
secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[3]] +
secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[4]] +
secondacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[5]]
{((((((17.0824 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^1) +
 O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^2}

{D[B, x3], D[B, x3], D[B, x3], D[B, x3]}
{((-0.03 + O[x3 - 73.8]^1) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
 ((-0.03 + O[x3 - 73.8]^1) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
 ((-0.03 + O[x3 - 73.8]^1) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
 ((-0.03 + O[x3 - 73.8]^1) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}

```

```

{D[B, x4], D[B, x5], D[B, x6], D[B, x7]}
{ (( (-0.51 + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]2) + O[x2 - 510.01]2) + O[x1 - 6.32]2,
  ((( (-4.64 + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]2) + O[x3 - 73.8]2) + O[x2 - 510.01]2) + O[x1 - 6.32]2,
  ((( (0.00073 + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]2) + O[x4 - 5.22]2) + O[x3 - 73.8]2) + O[x2 - 510.01]2) +
  O[x1 - 6.32]2,
  ((( ( (-0.063 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]2) + O[x5 - 0.37]2) + O[x4 - 5.22]2) + O[x3 - 73.8]2) +
  O[x2 - 510.01]2) + O[x1 - 6.32]2 }

{2 * Covariance[v][[3, 4]], 2 * Covariance[v][[3, 5]],
 2 * Covariance[v][[3, 6]], 2 * Covariance[v][[3, 7]]}
{2.63742, 3.84599, 10080.1, -1530.99}

terzacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza =
{D[B, x3], D[B, x3], D[B, x3], D[B, x3]} *
{D[B, x4], D[B, x5], D[B, x6], D[B, x7]} * {2 * Covariance[v][[3, 4]],
 2 * Covariance[v][[3, 5]], 2 * Covariance[v][[3, 6]], 2 * Covariance[v][[3, 7]]}
{ (( (0.0403526 + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]1) + O[x2 - 510.01]2) + O[x1 - 6.32]2,
  ((( (0.535361 + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]2) + O[x3 - 73.8]1) + O[x2 - 510.01]2) + O[x1 - 6.32]2,
  ((( ( (-0.220754 + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]2) + O[x4 - 5.22]2) + O[x3 - 73.8]1) + O[x2 - 510.01]2) +
  O[x1 - 6.32]2,
  ((( ( (-2.89357 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]2) + O[x5 - 0.37]2) + O[x4 - 5.22]2) + O[x3 - 73.8]1) +
  O[x2 - 510.01]2) + O[x1 - 6.32]2 }

```

14 | CCRMinsre240.nb

```

S23 = terzacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[1]] +
terzacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[2]] +
terzacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[3]] +
terzacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[4]]
{ ((( ( (-2.53861 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]1) +
  O[x2 - 510.01]2) + O[x1 - 6.32]2 }

{D[B, x4], D[B, x4], D[B, x4]}
{ (( (-0.51 + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]2) + O[x2 - 510.01]2) + O[x1 - 6.32]2,
  ((( (-0.51 + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]2) + O[x2 - 510.01]2) + O[x1 - 6.32]2,
  ((( (-0.51 + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]2) + O[x2 - 510.01]2) + O[x1 - 6.32]2 }

{D[B, x5], D[B, x6], D[B, x7]}
{ ((( (-4.64 + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]2) + O[x3 - 73.8]2) + O[x2 - 510.01]2) + O[x1 - 6.32]2,
  ((( (0.00073 + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]2) + O[x4 - 5.22]2) + O[x3 - 73.8]2) + O[x2 - 510.01]2) +
  O[x1 - 6.32]2,
  ((( ( (-0.063 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]2) + O[x5 - 0.37]2) + O[x4 - 5.22]2) + O[x3 - 73.8]2) +
  O[x2 - 510.01]2) + O[x1 - 6.32]2 }

{2 * Covariance[v][[4, 5]], 2 * Covariance[v][[4, 6]], 2 * Covariance[v][[4, 7]]}
{0.356078, 2632.26, 9.94726}

```

```

quartacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza =
{D[B, x4], D[B, x4], D[B, x4]} * {D[B, x5], D[B, x6], D[B, x7]} *
{2 Covariance[v][[4, 5]], 2 * Covariance[v][[4, 6]], 2 * Covariance[v][[4, 7]]}
{ (((0.842624 + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
  ((((-0.979989 + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) +
  O[x1 - 6.32]^2,
  (((((0.319605 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^2) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^2) +
  O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}

S24 = quartacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[1]] +
quartacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[2]] +
quartacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[3]]
{ (((((0.18224 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^2) +
  O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2

{D[B, x5], D[B, x5]}
{ ((((-4.64 + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2,
  ((((-4.64 + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}

{D[B, x6], D[B, x7]}
{ (((((0.00073 + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) +
  O[x1 - 6.32]^2,
  ((((((-0.063 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^2) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) +
  O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}

{2 Covariance[v][[5, 6]], 2 * Covariance[v][[5, 7]]}
{165.412, -13.197}

```

16 | CCRMinsre240.nb

```

quintacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza =
{D[B, x5], D[B, x5]} * {D[B, x6], D[B, x7]} * {2 Covariance[v][[5, 6]], 2 * Covariance[v][[5, 7]]}
{ (((((-0.560284 + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) + O[x2 - 510.01]^2) +
  O[x1 - 6.32]^2,
  (((((-3.85776 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^2) + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) +
  O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2}

S25 = quintacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[1]] +
quintacomponentesecondomembroequazionegeneraleincertezza[[2]]
{ (((((-4.41804 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) +
  O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2

2 * Covariance[v][[6, 7]]
-58.018.1

S26 = D[B, x6] * D[B, x7] * 2 * Covariance[v][[6, 7]]
{ (((((2.66825 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^2) + O[x4 - 5.22]^2) + O[x3 - 73.8]^2) +
  O[x2 - 510.01]^2) + O[x1 - 6.32]^2

incertezzagrandezzacorrelata = (s1 + S21 + S22 + S23 + S24 + S25 + S26)
{ ((((((15.9473 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^1) +
  O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^1}

```

Calcolo della incertezza estesa

```
Import["C:\\Documents and Settings\\Administrator\\Desktop\\MATE_STIMA
INCERTEZZA ESTESA\\V85_modello ccr minore 240.xls"]
```

```
{{{70.5024}, {72.2509}, {60.6299}, {48.1937}, {39.5167}, {68.5217}, {68.1408}, {55.8359},
{65.0403}, {48.3547}, {39.6776}, {55.9367}, {65.141}, {66.285}, {64.114}, {60.5442},
{70.628}, {37.4212}, {72.676}, {60.9908}, {61.6494}, {69.2932}, {37.4212}, {72.3625},
{60.6773}, {60.6374}, {50.1316}, {78.6296}, {78.9292}, {76.4801}, {70.4394}, {72.3895},
{75.0837}, {66.3858}, {55.445}, {54.713}, {63.5247}, {57.0116}, {43.9955}, {58.5272},
{50.1316}, {78.8289}, {76.2312}, {70.3669}, {66.3858}, {55.3226}, {55.445}, {54.713},
{63.5247}, {57.0116}, {43.9955}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}}}
```

18 | CCRM minore 240.nb

```
w = {{70.5023789314538}, {72.25094781667045}, {60.62991819475025}, {48.19370893050407},
{39.51667865284973}, {68.52165023879562}, {68.14083126106499}, {55.835940213169344},
{65.04029208497477}, {48.35467393050407}, {39.677643652849724}, {55.936680213169346},
{65.14103208497477}, {66.28498871683865}, {64.11396871683866}, {60.54418473139431},
{70.62801690318334}, {37.421227424581865}, {72.67600666349837}, {60.990836737469415},
{61.64940473139431}, {69.29321190318333}, {37.421227424581865}, {72.36247166349837},
{60.67730173746942}, {60.637381948957724}, {50.13160837013241}, {78.6295916361571},
{78.92918636180985}, {76.48009075809996}, {70.43935190484899}, {72.38947232348231},
{75.08368468406347}, {66.38577089027649}, {55.445031850678184}, {54.713031850678185},
{63.52467201639211}, {57.01159391536974}, {43.995493815597364}, {58.52716506811853},
{50.13160837013241}, {78.8289159461571}, {76.23116075809996}, {70.366914004849},
{66.38577089027649}, {55.322631850678185}, {55.445031850678184},
{54.713031850678185}, {63.52467201639211}, {57.01159391536974}, {43.995493815597364}}
{{70.5024}, {72.2509}, {60.6299}, {48.1937}, {39.5167}, {68.5217}, {68.1408},
{55.8359}, {65.0403}, {48.3547}, {39.6776}, {55.9367}, {65.141}, {66.285},
{64.114}, {60.5442}, {70.628}, {37.4212}, {72.676}, {60.9908}, {61.6494}, {69.2932},
{37.4212}, {72.3625}, {60.6773}, {60.6374}, {50.1316}, {78.6296}, {78.9292},
{76.4801}, {70.4394}, {72.3895}, {75.0837}, {66.3858}, {55.445}, {54.713},
{63.5247}, {57.0116}, {43.9955}, {58.5272}, {50.1316}, {78.8289}, {76.2312},
{70.3669}, {66.3858}, {55.3226}, {55.445}, {54.713}, {63.5247}, {57.0116}, {43.9955}}
```

Mean[w]

{61.2958}

k1 = 1

1


```

uy = Sqrt[incertezzagrandezzacorrelata]
{ ((((((3.99341 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]1) +
  O[x2 - 510.01]1) + O[x1 - 6.32]1}

Mean[w] + k1 * uy
{ ((((((65.2892 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]1) +
  O[x2 - 510.01]1) + O[x1 - 6.32]1}

Mean[w] - k1 * uy
{ ((((((57.3024 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]1) +
  O[x2 - 510.01]1) + O[x1 - 6.32]1}

Import["C:\\Documents and Settings\\Administrator\\Desktop\\MATE_STIMA
  INCERTEZZA ESTESA\\V85_reale ccr minore 240.xls"]
{{{78.}, {64.}, {57.}, {44.}, {35.}, {65.}, {56.}, {65.}, {73.}, {47.}, {44.}, {61.75},
  {70.3}, {71.}, {63.}, {67.}, {62.}, {41.}, {70.}, {64.}, {58.}, {72.}, {45.}, {67.},
  {69.}, {53.}, {50.}, {80.}, {68.}, {75.}, {67.8}, {80.75}, {81.}, {70.}, {50.},
  {55.}, {63.35}, {55.}, {42.}, {58.7}, {45.}, {82.8}, {78.}, {74.}, {70.}, {62.},
  {51.05}, {58.5}, {64.}, {56.}, {44.}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}}}

T = Transpose[{{78.}, {64.}, {57.}, {44.}, {35.}, {65.}, {56.}, {65.}, {73.}, {47.},
  {44.}, {61.75}, {70.3}, {71.}, {63.}, {67.}, {62.}, {41.}, {70.}, {64.}, {58.},
  {72.}, {45.}, {67.}, {69.}, {53.}, {50.}, {80.}, {68.}, {75.}, {67.8},
  {80.75}, {81.}, {70.}, {50.}, {55.}, {63.35}, {55.}, {42.}, {58.7}, {45.},
  {82.8}, {78.}, {74.}, {70.}, {62.}, {51.05}, {58.5}, {64.}, {56.}, {44.}}]
{{78., 64., 57., 44., 35., 65., 56., 65., 73., 47., 44., 61.75, 70.3, 71., 63., 67., 62., 41.,
  70., 64., 58., 72., 45., 67., 69., 53., 50., 80., 68., 75., 67.8, 80.75, 81., 70., 50.,
  55., 63.35, 55., 42., 58.7, 45., 82.8, 78., 74., 70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56., 44.}}

```

20 | CCRM minore 240.nb

```

P = {78., 64., 57., 44., 35., 65., 56., 65., 73., 47., 44., 61.75,
  70.3, 71., 63., 67., 62., 41., 70., 64., 58., 72., 45., 67., 69.,
  53., 50., 80., 68., 75., 67.8, 80.75, 81., 70., 50., 55., 63.35, 55.,
  42., 58.7, 45., 82.8, 78., 74., 70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56., 44.}

{78., 64., 57., 44., 35., 65., 56., 65., 73., 47., 44., 61.75, 70.3, 71., 63., 67., 62., 41.,
  70., 64., 58., 72., 45., 67., 69., 53., 50., 80., 68., 75., 67.8, 80.75, 81., 70., 50.,
  55., 63.35, 55., 42., 58.7, 45., 82.8, 78., 74., 70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56., 44.}

Length[P]
51

S1 =
Select[{78., 64., 57., 44., 35., 65., 56., 65., 73., 47., 44., 61.75, 70.3, 71.,
  63., 67., 62., 41., 70., 64., 58., 72., 45., 67., 69., 53., 50., 80., 68., 75.,
  67.8, 80.75, 81., 70., 50., 55., 63.35, 55., 42., 58.7, 45., 82.8, 78., 74.,
  70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56., 44.}, 65.28919835556863 > # > 57.30237718259742 &]

{64., 65., 65., 61.75, 63., 62., 64., 58., 63.35, 58.7, 62., 58.5, 64.}

Length[S1]
13

Percentualepuntiinfascia1 = Length[S1] * 100;
Percentualepuntiinfascia1 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia1
1300
51
k2 = 2
2

```

```

Mean[w] + k2 * uy
{ ((((((69.2826 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]1) +
  O[x2 - 510.01]1) + O[x1 - 6.32]1}

Mean[w] - k2 * uy
{ ((((((53.309 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]1) +
  O[x2 - 510.01]1) + O[x1 - 6.32]1}

S2 = Select[{78., 64., 57., 44., 35., 65., 56., 65., 73., 47., 44., 61.75,
  70.3, 71., 63., 67., 62., 41., 70., 64., 58., 72., 45., 67., 69.,
  53., 50., 80., 68., 75., 67.8, 80.75, 81., 70., 50., 55., 63.35, 55.,
  42., 58.7, 45., 82.8, 78., 74., 70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56., 44.},
  69.28260894205422` > # > 53.308966596111816` &]

{64., 57., 65., 56., 65., 61.75, 63., 67., 62., 64., 58.,
  67., 69., 68., 67.8, 55., 63.35, 55., 58.7, 62., 58.5, 64., 56.}

Length[S2]
23

Percentualepuntiinfascia2 = Length[S2] * 100;
Percentualepuntiinfascia2 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia2
2300
51

k3 = 3
3

Mean[w] + k3 * uy
{ ((((((73.276 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]1) +
  O[x2 - 510.01]1) + O[x1 - 6.32]1}

```

22 | CCRMinsre240.nb

```

Mean[w] - k3 * uy
{ ((((((49.3156 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]1) +
  O[x2 - 510.01]1) + O[x1 - 6.32]1}

S3 = Select[{78., 64., 57., 44., 35., 65., 56., 65., 73., 47., 44., 61.75,
  70.3, 71., 63., 67., 62., 41., 70., 64., 58., 72., 45., 67., 69.,
  53., 50., 80., 68., 75., 67.8, 80.75, 81., 70., 50., 55., 63.35, 55.,
  42., 58.7, 45., 82.8, 78., 74., 70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56., 44.},
  73.27601952853983` > # > 49.315556009626206` &]

{64., 57., 65., 56., 65., 73., 61.75, 70.3, 71., 63., 67., 62., 70., 64., 58., 72., 67., 69.,
  53., 50., 68., 67.8, 70., 50., 55., 63.35, 55., 58.7, 70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56.}

Length[S3]
34

Percentualepuntiinfascia3 = Length[S3] * 100;
Percentualepuntiinfascia3 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia3
200
3

k4 = 4
4

Mean[w] + k4 * uy
{ ((((((77.2694 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]1) +
  O[x2 - 510.01]1) + O[x1 - 6.32]1}

Mean[w] - k4 * uy
{ ((((((45.3221 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]1) +
  O[x2 - 510.01]1) + O[x1 - 6.32]1}

```

```

S4 =
Select[{78., 64., 57., 44., 35., 65., 56., 65., 73., 47., 44., 61.75, 70.3, 71.,
63., 67., 62., 41., 70., 64., 58., 72., 45., 67., 69., 53., 50., 80., 68., 75.,
67.8, 80.75, 81., 70., 50., 55., 63.35, 55., 42., 58.7, 45., 82.8, 78., 74.,
70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56., 44.}, 77.26943011502543` > # > 45.32214542314061` &]
{64., 57., 65., 56., 65., 73., 47., 61.75, 70.3, 71., 63., 67., 62., 70., 64., 58., 72., 67., 69.,
53., 50., 68., 75., 67.8, 70., 50., 55., 63.35, 55., 58.7, 74., 70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56.}

Length[S4]
37

Percentualepuntiinfascia4 = Length[S4] * 100;
Percentualepuntiinfascia4 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia4
3700
51

k5 = 5
5

Mean[w] + k5 * uy
{((((((81.2628 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^1) +
O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^1}

Mean[w] - k5 * uy
{((((((41.3287 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^1) +
O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^1}

```

24 | CCRMinsre240.nb

```

S5 =
Select[{78., 64., 57., 44., 35., 65., 56., 65., 73., 47., 44., 61.75, 70.3, 71.,
63., 67., 62., 41., 70., 64., 58., 72., 45., 67., 69., 53., 50., 80., 68., 75.,
67.8, 80.75, 81., 70., 50., 55., 63.35, 55., 42., 58.7, 45., 82.8, 78., 74.,
70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56., 44.}, 81.26284070151104` > # > 41.328734836655` &]
{78., 64., 57., 44., 65., 56., 65., 73., 47., 44., 61.75, 70.3, 71., 63., 67., 62.,
70., 64., 58., 72., 45., 67., 69., 53., 50., 80., 68., 75., 67.8, 80.75, 81., 70.,
50., 55., 63.35, 55., 42., 58.7, 45., 78., 74., 70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56., 44.}

Length[S5]
48

Percentualepuntiinfascia5 = Length[S5] * 100;
Percentualepuntiinfascia5 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia5
1600
17

k6 = 6
6

Mean[w] + k6 * uy
{((((((85.2563 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^1) +
O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^1}

Mean[w] - k6 * uy
{((((((37.3353 + O[x7 - 120.29]^1) + O[x6 - 526.2]^1) + O[x5 - 0.37]^1) + O[x4 - 5.22]^1) + O[x3 - 73.8]^1) +
O[x2 - 510.01]^1) + O[x1 - 6.32]^1}

```



```

S6 =
Select[{78., 64., 57., 44., 35., 65., 56., 65., 73., 47., 44., 61.75, 70.3, 71.,
63., 67., 62., 41., 70., 64., 58., 72., 45., 67., 69., 53., 50., 80., 68., 75.,
67.8, 80.75, 81., 70., 50., 55., 63.35, 55., 42., 58.7, 45., 82.8, 78., 74.,
70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56., 44.}, 85.25625128799663` > # > 37.3353242501694` &]

{78., 64., 57., 44., 65., 56., 65., 73., 47., 44., 61.75, 70.3, 71., 63., 67., 62., 41.,
70., 64., 58., 72., 45., 67., 69., 53., 50., 80., 68., 75., 67.8, 80.75, 81., 70., 50.,
55., 63.35, 55., 42., 58.7, 45., 82.8, 78., 74., 70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56., 44.}

Length[S6]
50

Percentualepuntiinfascia6 = Length[S6] * 100;
Percentualepuntiinfascia6 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia6
5000
51

k7 = 7
7

Mean[w] + k7 * uy
{((((((89.2497 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]1) +
O[x2 - 510.01]1) + O[x1 - 6.32]1}

Mean[w] - k7 * uy
{((((((33.3419 + O[x7 - 120.29]1) + O[x6 - 526.2]1) + O[x5 - 0.37]1) + O[x4 - 5.22]1) + O[x3 - 73.8]1) +
O[x2 - 510.01]1) + O[x1 - 6.32]1}

```

26 | CCRMinsre240.nb

```

S7 =
Select[{78., 64., 57., 44., 35., 65., 56., 65., 73., 47., 44., 61.75, 70.3, 71.,
63., 67., 62., 41., 70., 64., 58., 72., 45., 67., 69., 53., 50., 80., 68., 75.,
67.8, 80.75, 81., 70., 50., 55., 63.35, 55., 42., 58.7, 45., 82.8, 78., 74.,
70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56., 44.}, 89.24966187448224` > # > 33.3419136636838` &]

{78., 64., 57., 44., 35., 65., 56., 65., 73., 47., 44., 61.75, 70.3, 71., 63., 67., 62., 41.,
70., 64., 58., 72., 45., 67., 69., 53., 50., 80., 68., 75., 67.8, 80.75, 81., 70., 50.,
55., 63.35, 55., 42., 58.7, 45., 82.8, 78., 74., 70., 62., 51.05, 58.5, 64., 56., 44.}

Length[S7]
51

Percentualepuntiinfascia7 = Length[S7] * 100;
Percentualepuntiinfascia7 /= Length[P]; Percentualepuntiinfascia7
100

```